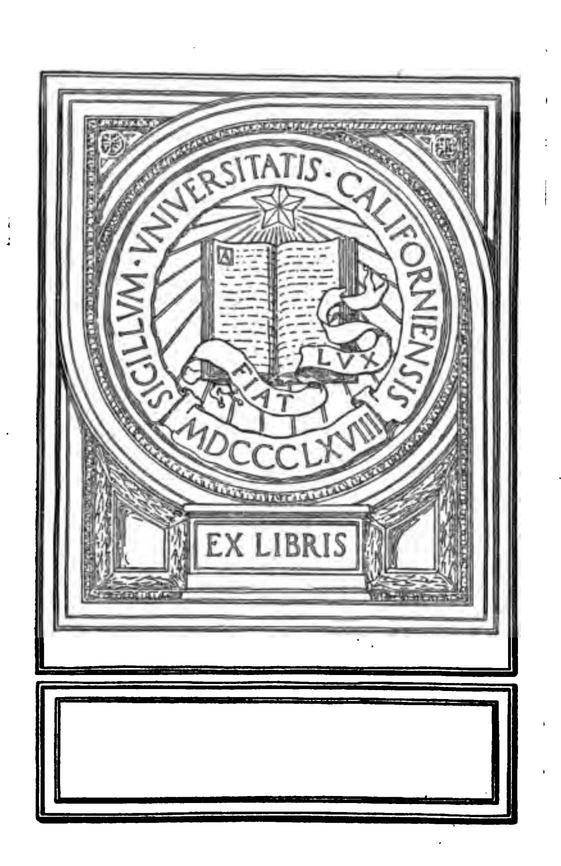
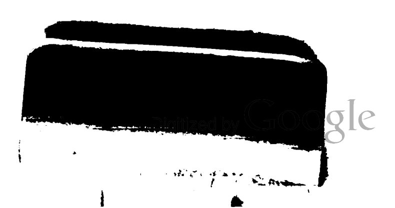

UC-NRLF
$B 79 426


SIGILLVM · VNIVERSITATIS · CALIFORNIENSIS
LVX
FIAT
MDCCCLXVIII
EX LIBRIS


Google

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛІОТЕКА.
ТОМЪ IV.

Многофазные электрическіе токи и двигатели перемѣннаго тока.

Проф. Сильвануса Томпсона.

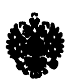
Переводъ съ англійскаго изданія

М. А. Шателена.

Съ 171 фигурами въ текстѣ.

С.-ПЕТЕРБУРГЪ.
Изданіе журнала „ЭЛЕКТРИЧЕСТВО“.
1898.

Печатано по распоряженію Императорскаго Русскаго Техническаго Общества.



Типографія Министерства Путей Сообщенія
(Высочайше утвержденнаго Товарищества И. Н. Кушнеревъ и К°), Фонтанка, 117.

ПРЕДИСЛОВІЕ АВТОРА.

По окончаніи курса Многофазныхъ токовъ, читаннаго авторомъ въ Technical College, Finsbury, осенью 1894 г., многіе слушатели обратились къ нему съ просьбой напечатать свои лекціи.

При приготовленіи курса къ печати, къ нему было многое добавлено, но не было сдѣлано никакихъ попытокъ уничтожить способъ устнаго изложенія и придать слогу литературный характеръ. Въ настоящемъ видѣ книга предназначается для инженеровъ и студентовъ. Для большаго выясненія связи между многофазными и обыкновенными однофазными токами, въ ней помѣщена вступительная глава. При составленіи книги автору много помогалъ Miles Walker, которому, между прочимъ, цѣликомъ принадлежитъ статья о графическомъ изученіи однофазныхъ двигателей (стр. 184—189).

Многія фирмы и многіе строители сообщали автору важныя свѣдѣнія относительно новѣйшихъ типовъ машинъ и послѣднихъ въ нихъ усовершенстваній, и этимъ лицамъ и фирмамъ авторъ считаетъ своей обязанностью выразить глубокую признательность. Особую благодарность заслуживаютъ: Allgemeine Electricitäts Gesellschaft (Берлинъ), Геліосъ (Кельнъ), Electricitäts Actien Gesellschaft (Шуккертъ) въ Нюренбергѣ, Эрликонъ (въ Цюрихѣ), Броунъ-Бовери и К° (въ Баденѣ, Швейцарія).

ПРЕДИСЛОВІЕ ИЗДАТЕЛЯ.

На русскомъ языкѣ до сихъ еще не было сколько нибудь систематическаго курса Многофазныхъ токовъ въ примѣненіи къ машинамъ. Этотъ пробѣлъ можетъ пополнить настоящій трудъ проф. Сильвануса Томпсона, служащій дополненіемъ къ извѣстному курсу динамомашинъ того же автора. Сравнительно съ англійскимъ подлинникомъ въ русскомъ переводѣ сдѣлано только одно сокращеніе: выпущены списки статей, касающихся многофазныхъ токовъ и помѣщенныхъ въ разныхъ журналахъ и списокъ англійскихъ привилегій на примѣненія многофазныхъ токовъ, какъ имѣющіе для русской публики мало значенія.

ГЛАВА I.

Многофазные генераторы.

Предварительныя замѣтки.

Излишне, намъ кажется, объяснять почему, въ настоящее время обращается особое вниманіе на многофазные электрическіе токи. Не подлежитъ почти никакому сомнѣнію, что со временемъ въ дѣлѣ электрической передачи энергіи перемѣнные токи, комбинированные въ 2-хъ или 3-хъ фазныя системы будутъ играть очень важную роль. Уже существуетъ нѣсколько примѣровъ подобныхъ установокъ и въ настоящее время устраиваются еще нѣсколько новыхъ, притомъ весьма большихъ размѣровъ.

Преимущества, которыми обладаютъ системы многофазныхъ токовъ сравнительно съ системами постоянныхъ токовъ или сравнительно съ обыкновенными однофазными перемѣнными токами въ примѣненіи къ передачѣ энергіи, не подлежатъ сомнѣнію. Остается посмотрѣть, насколько велики осложненія, являющіяся на практикѣ при примѣненіи многофазныхъ токовъ и могутъ ли эти осложненія быть вообще серьезнымъ препятствіемъ для примѣненія этихъ токовъ одновременно и для передачи энергіи, и для электрическаго освѣщенія.

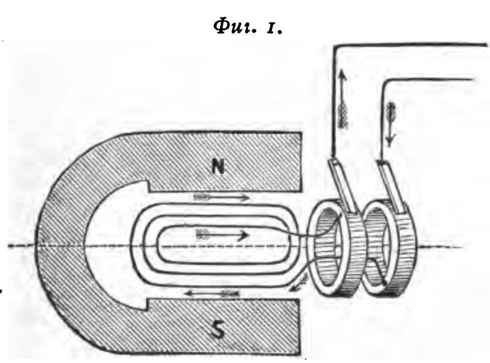
Настоящій курсъ будетъ раздѣленъ на слѣдующіе отдѣлы: I. Генераторы многофазныхъ токовъ. II. Свойства вращающагося магнитнаго поля съ нѣкоторыми историческими замѣтками. III. Теорія и устройство многофазныхъ двигателей. IV. Теорія и устройство двигателей обыкновеннаго однофазнаго перемѣннаго тока. V. Теорія многофазныхъ трансформаторовъ и способы измѣренія энергіи въ многофазныхъ системахъ.

Перемѣнные токи.

Съ самаго начала мы будемъ предполагать, что читатель имѣетъ основныя свѣдѣнія о перемѣнныхъ токахъ, а также знакомъ въ общихъ чертахъ съ альтернаторами или генераторами перемѣннаго тока *).

Несмотря на это, будетъ полезно повторить важнѣйшія положенія касательно перемѣнныхъ токовъ.

Фиг. 1.



Простой генераторъ перемѣннаго тока (однофазный).

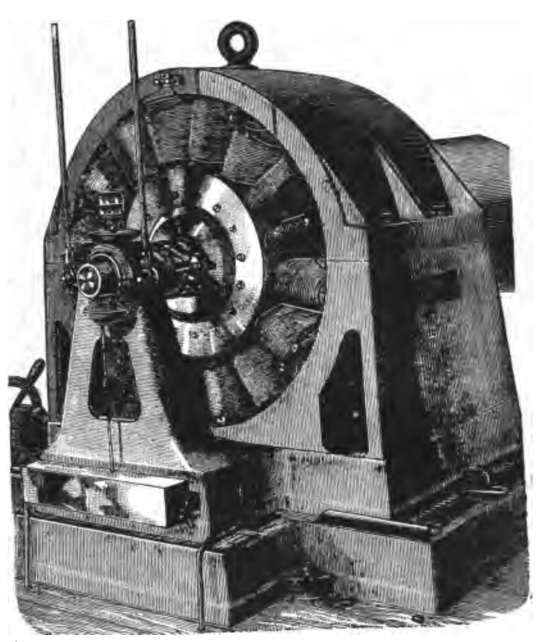
Открытіе Фарадея относительно индукціи токовъ въ проволокахъ, движущихся въ магнитномъ полѣ и пересѣкающихъ магнитныя линіи, навело на мысль строить магнитоэлектрическія машины для полученія токовъ на счетъ механической энергіи. Если помѣстить, какъ на фиг. 1, между двумя магнитными полюсами катушку надлежащей формы и вращать ее вокругъ горизонтальной оси, то въ ней появятся токи, которые при каждомъ полуоборотѣ уничтожаются, потомъ опять появляются. На чертежѣ предполагается, что катушка вращается такъ, что ея верхняя часть движется по направленію къ читателю. При этомъ стрѣлки показываютъ направленіе индуктированныхъ токовъ, идущихъ во внѣшнюю цѣпь черезъ два контактныхъ кольца, соединенныхъ съ соотвѣтствующими концами катушки. При данномъ положеніи токъ идетъ въ лѣвое кольцо и возвращается изъ цѣпи въ правое; но на полъоборота позже онъ пойдетъ въ правое кольцо и возвратится изъ цѣпи въ лѣвое. Чертежъ 1 изображаетъ ничто иное, какъ примитивную форму альтернатора, дающаго простой періодическій мѣняющій напра-

---

*) См. *Elementary Lessons in Electricity and Magnetism* by S. P. Tompson и «*Dynamo-Electric Machinery*» того же автора.

вленіе, или перемѣнный, токъ. Это нѣчто вродѣ альтернатора, извѣстнаго подъ именемъ «индуктора» и употребляемаго для звонковъ въ телефонныхъ установкахъ. Въ перемѣнныхъ токахъ сила тока быстро мѣняется, увеличиваясь и уменьшаясь и какъ въ линіи такъ и цѣпи она подъ вліяніемъ быстро измѣняющейся электродвижущей силы, быстро колеблется десятки и сотни разъ въ секунду. Какъ извѣстно, свойства перемѣнныхъ токовъ нѣсколько разнятся отъ свойствъ постоянныхъ токовъ. На нихъ

Фиг. 2.



Альтернаторъ Вестингауза (однофазный).

вліяетъ не только сопротивленіе цѣпи, но также ея электромагнитная инерція или самоиндукція (другими словами магнитное поле, которое образуется вокругъ нея), именно самоиндукція цѣпи имѣетъ вредное дѣйствіе на перемѣнные токи, уменьшая ихъ амплитуду, задерживая ихъ фазу и сглаживая ихъ волны.

На фиг. 1 вращающаяся арматура была простая катушка, а магнитъ простая двухполюсная подкова. Но, по причинамъ, ко-

торыя будутъ приведены ниже, большинство альтернаторовъ перемѣннаго тока бываютъ многополюсные. На фиг. 2 показана очень часто встрѣчающаяся форма альтернатора, введенная компаніей Вестингауза, съ многополюсными индукторами, состоящими изъ нѣсколькихъ радіальныхъ полюсовъ, обращенныхъ внутрь. Вращающіяся катушки сгруппированы на периферіи барабана или цилиндра, составленнаго изъ желѣзныхъ дисковъ.

Чтобы познакомится со способами соединенія проволокъ въ арматурахъ альтернаторовъ, мы должны прежде заняться изученіемъ направленія токовъ, индуктируемыхъ въ этихъ провололокахъ.

Фиг. 3.

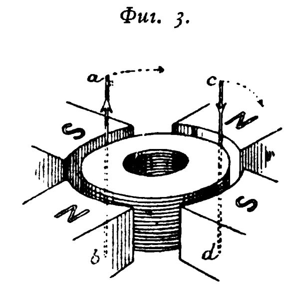


Схема четырехполюснаго поля.

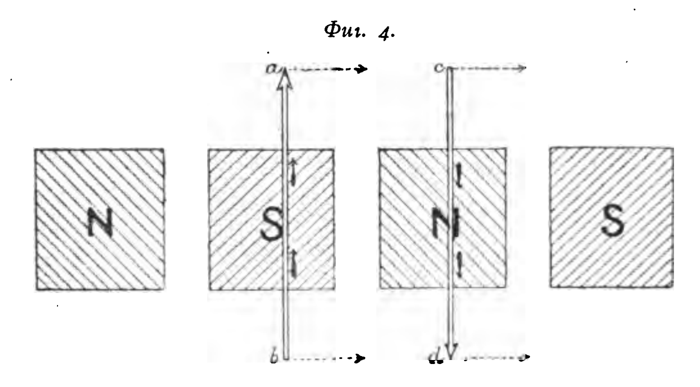
Обратимся для этого къ фиг. 3, которая изображаетъ часть 4-хъ-полюсной машины, положенной на бокъ.

Сердечникъ, который долженъ получить надлежащую обмотку, помѣщенъ между четырьмя полюсами различной перемѣнной полярности. Если помѣстить мѣдный прутъ *ab* параллельно оси, такъ, чтобы онъ изображалъ одинъ изъ проводниковъ арматуры и предположить, что онъ вращается въ пространствѣ между полюсами, перемѣщаясь слѣва направо противъ полюса *S*, то онъ пересѣчетъ магнитныя линіи, входящія въ этотъ полюсъ. По правилу, изложенному ниже, индуктированная электродвижущая сила въ немъ будетъ направлена вверхъ. Въ другомъ проводникѣ *cd*, проходящемъ противъ полюса *N*, индуктированная электродвижущая сила будетъ направлена внизъ. Если бы кто нибудь захотѣлъ на подобномъ чертежѣ показать двадцать или болѣе проводниковъ и ихъ соотвѣтствующія соединенія, то чертежъ вышелъ бы совсѣмъ непонятнымъ. Чтобы сдѣлать чертежъ понятнымъ, вообразимъ себя стоящими въ центрѣ и панораму четырехъ полюсовъ, которая намъ представится вообразимъ развернутой на плоскости, какъ это показано на фиг. 4.

Надо замѣтить, что, во избѣжаніе недоразумѣній на этомъ чертежѣ, какъ и на слѣдующихъ, разрѣзы Сѣв. и Южн. полю-

совъ заштрихованы косыми линіями различно направленными. Косыя линіи примѣнены на основаніи слѣдующаго соображенія:

Фиг. 4.

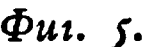


Развернутое на плоскости четырехполюсное поле.

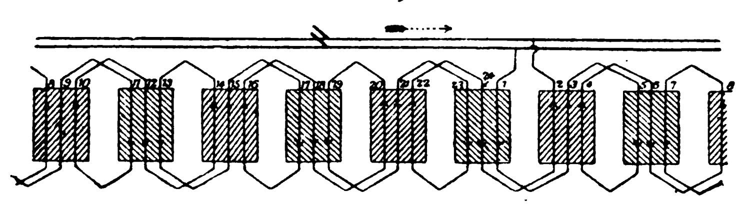
Если бы вмѣсто линіи *ab* (представляющей проводникъ) помѣстить на изображеніе разрѣза полюса кусокъ бумаги съ узенькой щелью и передвигать ее вправо, какъ показываютъ пунктирныя стрѣлки, то щель, проходя надъ косыми линіями, вызоветъ кажущееся ихъ перемѣщеніе въ томъ направленіи, въ которомъ токъ стремится идти въ дѣйствительности. Легко помнить, въ которую сторону должны наклоняться косыя линіи: на сѣв. полюсѣ онѣ должны быть параллельны наклонной палочкѣ въ буквѣ *N*.

Въ дѣйствительности въ машинѣ на арматурѣ имѣется всегда много проводниковъ, расположенныхъ симметрично кругомъ по ея периферіи, соединенныхъ между собою при помощи соединительныхъ проволокъ или соединительныхъ частей. Въ кольцевыхъ арматурахъ соединительный проводникъ проходитъ черезъ внутренность кольцеваго сердечника и образуетъ такимъ образомъ *спиральную обмотку*. Если мы будемъ разсматривать только тѣ случаи, гдѣ обмотка помѣщена исключительно на наружной поверхности сердечинковъ, какъ напримѣръ въ барабанныхъ и дисковыхъ арматурахъ, то мы можемъ замѣтить, что существуютъ два различныхъ способа обмотки, которые мы назовемъ: *петлеобразной обмоткой* и *волнообразной обмоткой*. Разница между ними слѣдующая. Такъ какъ въ проводникахъ, которые проходятъ передъ сѣв. полюсами, возникаетъ электродвижущая сила въ одномъ направленіи, а въ

проводникахъ, которые проходятъ передъ южн. полюсами, въ противоположномъ, то ясно, что проводникъ одной изъ этихъ группъ долженъ быть соединенъ съ проводникомъ другой группы, находящемся приблизительно въ соотвѣтствующемъ положеніи, такъ, чтобы токъ могъ идти внизъ въ одномъ и вверхъ въ другомъ, смотря по направленію электродвижущихъ силъ. Такимъ образомъ проводникъ, идущій внизъ противъ сѣв. полюса, долженъ быть соединенъ съ проводникомъ, идущимъ вверхъ противъ южн. полюса, и обмотка очевидно можетъ быть устроена такъ, что проводники будутъ или загибаться назадъ петлей или идти зигзагами впередъ. Различіе между петлеобразной и волнообраз-



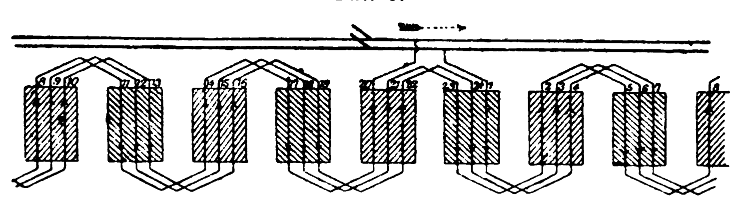
Фиг. 5.



Машина перемѣннаго тока: петлеобразная обмотка.

ной обмотками, примѣненными къ машинамъ перемѣннаго тока, можно видѣть на фигурахъ 5 и 6. Фигура 5 изображаетъ 8-ми-полюсный альтернаторъ съ петлеобразной обмоткой, причемъ каждый «элементъ» или рядъ петель занимаетъ то же простран-

Фиг. 6.



Машина перемѣннаго тока: волнообразная обмотка.

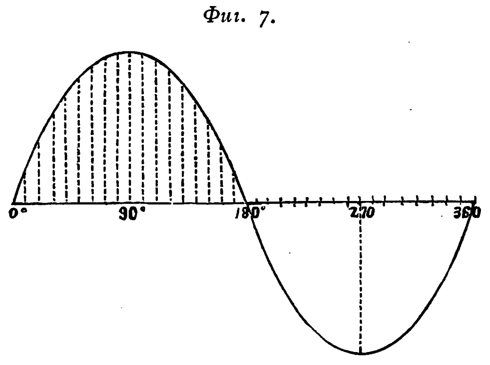
ство, что и «пропускъ» или разстояніе между центрами двухъ сосѣднихъ полюсовъ. На чертежѣ изображено только 24 проводника. Надо замѣтить, что петли идутъ поперемѣнно то справа налѣво, то слѣва направо. На фиг. 6 показанъ

тотъ же альтернаторъ съ волнообразной обмоткой. Электродвижущая сила въ обѣихъ машинахъ совершенно одинакова и выборъ между двумя методами соединенія зависитъ исключительно отъ удобства постройки и стоимости.

Въ томъ случаѣ, когда арматура вращается, начало и конецъ обмотки соединяются съ двумя кольцами, которые на этихъ развернутыхъ рисункахъ изображены двумя параллельными линіями.

На простой вращающейся катушкѣ, изображенной на фиг. 1, мы видѣли уже, какимъ образомъ въ ней, когда она перерѣзываетъ линіи магнитнаго поля, появляются періодическія электродвижущія силы, которыя мѣняютъ направленіе при каждомъ полуоборотѣ, возбуждая перемѣнные токи. Во время полнаго оборота является электродвижущая сила, которая увеличивается до максимума и потомъ падаетъ до нуля; за ней немедленно слѣдуетъ обратная электродвижущая сила, которая также увеличивается до максимума и затѣмъ падаетъ до нуля. Все это изображено волнообразной кривой на фиг. 7. Высоты

Фиг. 7.



Кривая индуктированной электродвижущей въ обыкновенномъ (однофазномъ) альтернаторѣ.

кривой надъ горизонтальной линіей представляютъ мгновенныя величины электродвижущихъ силъ; высоты же во второй половинѣ кривой представляютъ обратныя электродвижущія силы, слѣдующія за первыми. Рядъ подобныхъ измѣненій называется *періодомъ*, и число періодовъ, совершенныхъ въ секунду, называется *частотой* или *періодичностью* альтернацій и обозначается буквой n. Въ 2-хъ-полюсныхъ машинахъ n то же самое, что и

число оборотовъ арматуры въ секунду, но въ многополюсныхъ машинахъ n больше во столько разъ, сколько въ машинѣ паръ полюсовъ. Такъ, въ 8-ми полюсномъ полѣ съ 4-мя сѣв. полюсами и 4-мя южн. при каждомъ оборотѣ происходитъ 4 полныхъ періода. Если подобная машина дѣлаетъ 15 оборотовъ въ секунду (или 900 въ минуту), то число періодовъ въ секунду будетъ 60 или періодичность выразится цифрой 60. Когда вращеніе происходитъ въ однородномъ полѣ, возбуждающіяся электродвижущія силы будутъ пропорціональны синусу угла, на который катушка повернулась отъ того положенія, въ которомъ она лежитъ поперекъ поля. Если въ этомъ положеніи потокъ магнитныхъ линій, пронизывавшій нее, былъ **N** и если обозначить черезъ S число оборотовъ проволоки въ катушкѣ, то можно показать, что величина индуктированной электродвижущей силы въ какой нибудь моментъ времени t, когда катушка повернута на уголъ $\Theta = 2\pi nt$, будетъ *)

$$E_\theta = 2\pi n S \mathbf{N} \sin \Theta \div 10^8$$

или, обозначая величину $2\pi n S \mathbf{N} \div 10^8$ буквою D, получимъ

$$E_\theta = D \sin \Theta.$$

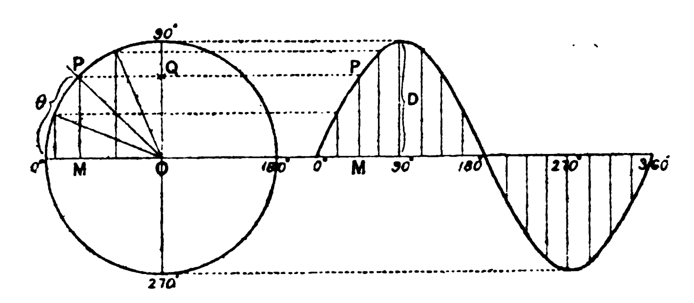
Въ дѣйствительно существующихъ машинахъ магнитное поле не однородно, а также катушка не представляетъ изъ себя простыхъ петель, такъ что періодическое возрастаніе и убываніе электродвижущей силы не будетъ необходимо слѣдовать простому закону синусовъ. Форма образующихся волнъ будетъ зависѣть отъ формы полюсныхъ наконечниковъ, а также отъ формы и ширины катушекъ. Однако въ большинствѣ случаевъ мы можемъ, не отклоняясь особенно отъ истины, принять, что измѣненіе электродвижущей силы происходитъ по закону синусовъ, такъ что величина этой силы въ каждый моментъ можетъ быть выражена вышеприведенной формулой, гдѣ D есть наибольшая

*) Знакъ $\div$ означаетъ дѣйствіе дѣленія и принятъ въ формулахъ для приданія имъ болѣе удобнаго вида.



величина, или *амплитуда*, достигаемая E, а Θ — уголъ *фазы* на воображаемомъ вспомогательномъ кругѣ. Представимъ себѣ точку *P*, движущуся въ сторону движенія часовой стрѣлки, по окружности нѣкотораго круга (фиг. 8). Если радіусъ круга принять за единицу, то длина *PM* изобразитъ синусъ угла Θ, измѣряе-

Фиг. 8.



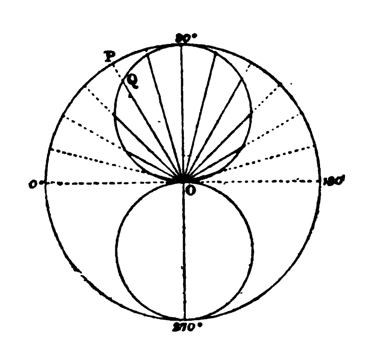
маго отъ точки O°. Раздѣлимъ кругъ на нѣкоторое число равныхъ угловъ и начертимъ для каждаго изъ нихъ синусъ. Отложимъ затѣмъ эти синусы на равныхъ другъ отъ друга разстояніяхъ перпендикулярно къ горизонтальной прямой (фиг. 8). Концы ихъ дадутъ синусоидальную кривую. На фиг. 8 каждый оборотъ точки *P* на окружности соотвѣтствуетъ полной перемѣнѣ (альтернаціи) или полному циклу измѣненій. Величина электродвижущей силы (измѣняющейся между предѣльными значеніями $+D$ и $-D$) можетъ быть въ каждый моментъ изображена синусомъ *PM* или проекціей этой длины на вертикальный діаметръ, т. е. длиной *OQ*. При движеніи точки *P* по кругу, точка *Q* будетъ колебаться вдоль вертикальнаго діаметра.

Токи, появляющіеся вслѣдствіе существованія этой періодической или перемѣнной электродвижущей силы, будутъ тоже періодическіе или перемѣнные; они увеличиваются до нѣкотораго максимума, затѣмъ уменьшаются, мѣняютъ свое направленіе, усиливаются въ этомъ направленіи, ослабѣваютъ и вновь мѣняютъ направленіе. Если электродвижущая сила совершаетъ 100 такихъ цикловъ въ секунду, то столько же ихъ будетъ совершать и токъ.

Существуетъ еще другой способъ изображенія періодическихъ измѣненій такого рода, именно способъ изображенія при помощи

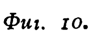
діаграммъ подобныхъ золотниковымъ діаграммамъ Цейнера. Возьмемъ, какъ и раньше, вспомогательный кругъ, по которому движется точка P (фиг. 9 — внѣшній кругъ). На каждомъ изъ вертикальныхъ радіусовъ построимъ по кругу. Тогда отрѣзки радіусовъ, подобныя OQ, будутъ изображать величины синусовъ соотвѣтствующихъ угловъ. Если заставить карту съ прорѣзанной въ ней узкой щелью вращаться поверхъ чертежа, то пересѣченіе щели съ окружностями двухъ внутреннихъ круговъ покажетъ величину электродвижущей силы въ различные моменты.

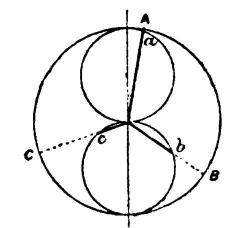
Фиг. 9.



Читатель, который желалъ бы подробнѣе познакомиться съ графическими методами изученія занимающаго насъ вопроса, долженъ обратиться къ превосходнымъ трудамъ Флеминга [1]) Блэкслея [2]) и Каппа [3]).

Примѣненіе подобнаго построенія къ трехфазной системѣ показано на фиг. 10, гдѣ предполагается, что три линіи, расположенныя подъ угломъ въ 120° другъ относительно друга, вращаются позади двухъ круговыхъ отверстій. Длины ихъ, видимыя въ каждый моментъ, изображаютъ величины электродвижущихъ силъ въ трехъ цѣпяхъ, въ тотъ же моментъ.


Фиг. 10.



Обыкновенные измѣрительные приборы для перемѣнныхъ токовъ, напр. электродинамометры, вольтметры Кардью и электростатическіе вольметры измѣряютъ не среднюю ариѳметическую амперъ или вольтъ. Эти инструменты, если они калибрированы постояннымъ токомъ, даютъ корень квадратный изъ средней ариѳмети-

---

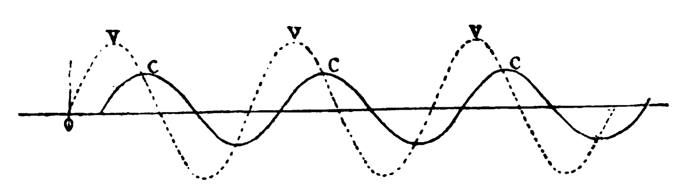
[1]) *Fleming*. «The Alternate Current Transformer».

[2]) *Blakesley*. «Alternating Currents of Electricity». Русск. пер. подъ ред. Лебединскаго.

[3]) *Kapp*. «On alternate current Machinery». Proc. Inst. Civ. Engineers» 1889 pt. III.

ческой квадратовъ числа вольтъ или amперъ въ каждый моментъ. Они измѣряютъ то, что называется «*дѣйствующими амперами*» или «*дѣйствующими вольтами*». Величина, которую они измѣряютъ (если предположить, что измѣненія амперъ или вольтъ слѣдуютъ закону синусовъ), равняется 0,707 ихъ наибольшей величины. такъ какъ средняя ариѳметическая изъ квадратовъ синусовъ (взятыхъ въ одномъ квадрантѣ или во всемъ кругѣ) равняется $\frac{1}{2}$, и слѣд. корень квадратный изъ средней ариѳметич. квадратовъ числа вольтъ и амперъ будетъ равняться $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ихъ наибольшаго числа. Если напримѣръ вольтметръ включенъ въ цѣпь, въ которой вольты измѣняются между +100 и —100, то онъ укажетъ 70,7 вольта и чтобы на томъ же приборѣ получить

Фиг. 11.



Кривая тока запаздывающаго относительно электродвижущей силы.

70,7 вольта отъ постояннаго тока, надо имѣть у его зажимовъ именно эту разность потенціаловъ. Если амперметръ перемѣннаго тока показываетъ 100 амперъ, то это значитъ, что на самомъ дѣлѣ токъ увеличивается до +141,4 и затѣмъ въ обратную сторону до —141,4 амп., но что дѣйствіе его равно дѣйствію 100 амперъ постояннаго тока. Поэтому можно сказать, что этотъ перемѣнный токъ имѣетъ силу въ 100 дѣйствующихъ амперъ.

Сила перемѣннаго тока не всегда растетъ одновременно съ электродвижущей силой въ цѣпи. Если цѣпь обладаетъ нѣкоторой *самоиндукціей*, то сила тока *запаздываетъ;* если же въ цѣпи имѣется емкость, то сила тока будетъ *упреждать* электродвижущую силу. Фиг. 11 иллюстрируетъ запаздываніе, производимое самоиндукціей. Кривая, обозначенная буквой *V*, изображаетъ перемѣнные вольты, кривая же *C*—есть кривая тока.

Разстоянія, измѣряемыя отъ точки O вдоль по горизонтальной прямой, изображаютъ времена. Импульсы тока, изображаемые болѣе черной линіей, начинаются *позже*, чѣмъ импульсы электродвижущей силы. Самоиндукція производитъ еще одно дѣйствіе, болѣе важное, чѣмъ запаздываніе силы тока по фазѣ: она вызываетъ явленіе, противодѣйствующее электродвижущей силѣ и уменьшающее силу тока. Когда токъ стремится усилиться, дѣйствіе самоиндукціи стремится помѣшать этому усиленію. Чтобы произвести токъ въ 40 амперъ въ цѣпи съ сопротивленіемъ въ $1\frac{1}{2}$ ома, при постоянномъ токѣ потребуется электродвижущая сила въ 60 вольтъ. Но 60 перемѣнныхъ вольтъ будетъ недостаточно, если цѣпь обладаетъ самоиндукціей. Явленіе усложняется еще тѣмъ, что импульсы противодѣйствующей электродвижущей силы тоже отстаютъ, именно они отстаютъ ровно на $\frac{1}{4}$ періода отъ тока. Если напримѣръ перемѣнный токъ съ n періодами въ секунду, имѣющій силу въ C дѣйствующихъ амперъ, проходитъ черезъ цѣпь, коэффиціентъ самоиндукціи которой равенъ L, то противодѣйствующая электродвижущая сила будетъ $2\pi nLC$ [1]) дѣйствующихъ вольтъ. Если напримѣръ $L=0{,}002$ генри, $n=50$ пер. въ сек., и $C=40$ амперъ, то противодѣйствующая электродвижущая сила будетъ 25,1 вольта. Теперь, если мы пожелаемъ получить 40 дѣйствующихъ амперъ въ цѣпи, имѣющей не только сопротивленіе въ $1\frac{1}{2}$ ома, но и указанный коэффиціентъ самоиндукціи, то намъ потребуется болѣе 60 вольтъ. Но требуемое

---

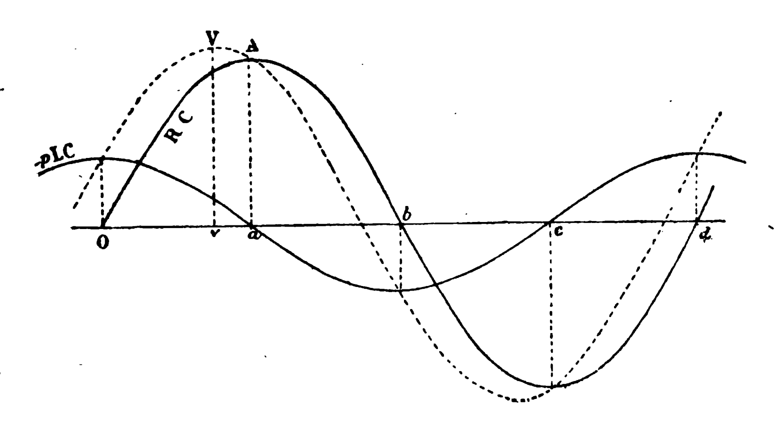
[1]) Разсчитать это можно слѣдующимъ образомъ. По опредѣленію коэффиціентъ самоиндукціи L есть число магнитныхъ линій, создаваемыхъ цѣпью, когда сила проходящаго по ней тока равна единицѣ. Слѣдовательно когда сила тока равна C, то число магнитныхъ линій будетъ CL. Такъ какъ электродвижущая сила самоиндукціи пропорціональна скорости измѣненія этой величины, то мы можемъ написать $E = L\frac{dc}{dt}$. Мы предполагаемъ, что C есть синусоидальная функція отъ t т. е. $C = C_0 \sin 2\pi nt$, гдѣ C_0—есть наибольшее значеніе C. Произведя нужное дифференцированіе по t, получимъ $\frac{dc}{dt} = 2\pi n C_0 \cos 2\pi nt$. Такъ какъ корень квадратный изъ средней ариѳметической суммы квадратовъ синусовъ и косинусовъ будетъ одинъ и тотъ же, то мы и получимъ для E величину $2\pi nCL$, но только фаза ея будетъ отличаться отъ фазы тока на $\frac{1}{4}$ періода.



число не будетъ $60+25{,}1$ вольта. Законъ Ома становится въ этомъ случаѣ непримѣнимымъ. Чтобы найти, сколько намъ потребуется вольтъ, придется прибѣгнуть къ помощи геометріи.

Построимъ волнообразную кривую *OAbd* (фиг. 12), которая изображала бы вольты, нужные, чтобы получить токъ въ сопротивленіи, если бы въ немъ не было самоиндукціи. Масштабъ чертежа можетъ быть выбранъ такъ, чтобы ордината *aA* изображала число 60. Эту кривую можно назвать кривой тока. Затѣмъ построимъ кривую $-pLC$, которая изображала бы вольты необходимые для уравновѣшенія дѣйствія самоиндукціи. Тутъ черезъ

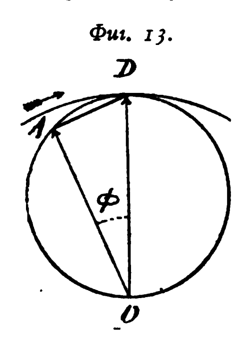
Фиг. 12.



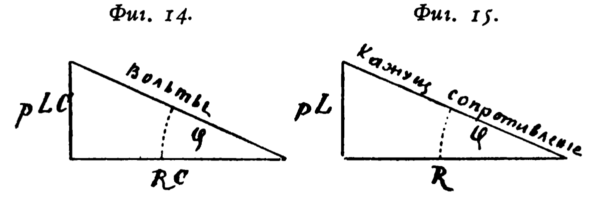
p для сокращенія обозначено произведеніе $2\pi n$. Ордината въ точкѣ O равняется 25,1. Кривая сдвинута назадъ относительно кривой тока на $^1/_4$ періода, такъ какъ когда токъ возрастаетъ съ наибольшей быстротой, какъ въ точкѣ O, дѣйствіе самоиндукціи будетъ наибольшее. Соединимъ теперь въ одно обѣ кривыя, складывая ихъ соотвѣтственныя ординаты, и построимъ такимъ образомъ пунктирную кривую съ максимумомъ въ точкѣ V. Это будетъ кривая вольтъ, которые нужно имѣть въ цѣпи съ самоиндукціей, чтобы получить требуемый токъ. Легко видѣть, что кривая тока достигаетъ максимума нѣсколько позднѣе кривой вольтъ. Сила тока отстаетъ по фазѣ отъ электродвижущей силы. Если *Od* изображаетъ время полнаго періода, отрѣзокъ *va* изображаетъ время, протекающее между максимумами вольтъ и амперъ.

На фиг. 13 тоже самое представлено на круговой діаграммѣ, подобной діаграммѣ фиг. 9. Прямая AO изображаетъ работающіе вольты $R \times C$, прямая же AD, лежащая подъ прямымъ угломъ къ OA, изображаетъ вольты, производимые самоиндукціей, т. е. pLC. Складывая ихъ, какъ складываютъ силы, получимъ прямую OD, изображающую приложенные къ цѣпи вольты. Проэкціи этихъ трехъ длинъ на вертикальную линію, когда діаграмма вращается вокругъ центра O, даютъ значеніе этихъ трехъ величинъ въ каждый моментъ. Уголъ AOD или φ, на который сила тока отстаетъ отъ приложенной электродвижущей силы, называется *угломъ отставанія* или *запаздыванія*. Какъ бы велики не были самоиндукціи и частота, уголъ φ никогда не можетъ быть больше 90_0. Если OA равняется 60 и AD—25,1, то OD будетъ равняться 65 вольтамъ. Выражая сказанное формулой, мы должны написать, что число приложенныхъ вольтъ должно быть таково, чтобы

Фиг. 13.



Фиг. 14. Фиг. 15.



$$E^2 = (RC)^2 + (pLC)^2$$

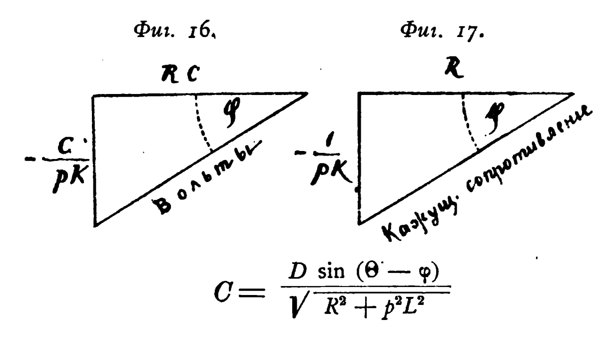
откуда

$$C = \frac{E}{\sqrt{R^2 + p^2L^2}}.$$

Знаменатель, входящій въ послѣднюю формулу, называется *кажущимся сопротивленіемъ* цѣпи.

Изъ чертежей 14 и 15 видно, что $\operatorname{tang} \varphi = \frac{pLC}{RC}$ или $\operatorname{tang} \varphi = \frac{pL}{R}$. Очевидно, что вліяніе самоиндукціи сводится къ тому, что сопротивленіе цѣпи какъ бы возрастаетъ отъ R до $\sqrt{R^2 + p^2L^2}$.

На самомъ дѣлѣ сила перемѣннаго тока зависитъ не отъ истиннаго сопротивленія цѣпи, но отъ кажущагося. Въ то же время сила тока отстаетъ такъ, какъ будто бы уголъ, который мы обозначили черезъ Θ, будетъ не Θ, а $(\Theta - \varphi)$, такъ что уравненіе для величины C въ какой-либо моментъ, когда $E = D \sin \Theta$, будетъ



Фиг. 16. *Фиг. 17.*

$$C = \frac{D \sin (\Theta - \varphi)}{\sqrt{R^2 + p^2 L^2}}$$

Эта формула есть выраженіе закона Максвелля для періодическихъ токовъ, въ которыхъ самоиндукція вызываетъ запаздываніе. Такъ какъ на показанія измѣрительныхъ приборовъ не вліяетъ уголъ отставанія, и они указываютъ дѣйствующіе вольты и амперы, то обыкновенно достаточна болѣе простая формула для C, приведенная выше.

Емкость, введенная въ цѣпь (фиг. 16 и 17) перемѣннаго тока напр. посредствомъ включенія конденсатора, заставляетъ токъ *упреждать* по фазѣ электродвижущую силу. Дѣйствительно, когда вольты мѣняются наиболѣе быстро (какъ въ точкѣ O на фиг. 11), переходя отъ отрицательныхъ значеній къ положительнымъ, токъ, идущій въ конденсаторъ, будетъ наибольшимъ. Такимъ образомъ наивысшая точка кривой тока будетъ приблизительно на 90^0 впереди наибольшей точки кривой вольтъ. Конденсаторъ стремится не продолжить токъ, но направить его обратно и заставляетъ его измѣнить направленіе раньше, чѣмъ измѣнится направленіе вольтъ. Поэтому реакція емкости *) выражается форму-

---

*) *Реакціей емкости* и *реакціей самоиндукціи* мы будемъ называть величины $\frac{1}{pK}$ и pL. Величину же $\left(pL - \frac{1}{pK}\right)$ — *реакціей цѣпи*.

Прим. пер.

лой — $\frac{1}{pK}$ и уголъ φ будетъ такимъ, что tang $\varphi = \frac{1}{pKR}$. Кажущееся сопротивленіе будетъ $\sqrt{R^2 + \frac{1}{p^2K^2}}$.
Если въ цѣпи есть одновременно и самоиндукція и емкость, то

$$\text{tang}\ \varphi = \left(pL - \frac{1}{pK}\right) \times \frac{1}{R}.$$

Реакція цѣпи будетъ

$$pL - \frac{1}{pK}$$

Кажущееся сопротивленіе

$$\sqrt{R^2 + \left(pL - \frac{1}{pK}\right)^2}$$

Такъ какъ емкость и самоиндукція производятъ обратныя дѣйствія, то ихъ можно заставлять нейтрализовать другъ друга. Ихъ дѣйствія будутъ какъ разъ взаимно уравновѣшиваться, когда

$$L = \frac{1}{p^2K}.$$

Въ этомъ случаѣ токи подчиняются прямо закону Ома.

Легко видѣть, что если какая-нибудь цѣпь обладаетъ малымъ сопротивленіемъ, но значительной реакціей, то сила тока будетъ зависѣть почти исключительно отъ этой послѣдней. Напримѣръ, если p ($= 2\pi n$) будетъ 1000, а $L = 10$ генри и $R = 1$ ому, то сопротивленіемъ можно совершенно пренебрегать и считать

$$C = \frac{E}{pL}.$$

Катушки съ большимъ кажущимся сопротивленіемъ (съ большой самоиндуціей) и съ малымъ истиннымъ сопротивленіемъ иногда употребляются для измѣненія силы перемѣннаго тока и называются тогда *реагирующими* (реакціонными) катушками Если токъ пускать черезъ конденсаторъ малой емкости (напр. съ $K = \frac{1}{10}$ микрофарады, т. е. $\frac{1}{pK} = 10000$), то токъ, входящій въ конденсаторъ и выходящій изъ него, будетъ зависѣть только отъ емкости и отъ частоты тока, а не отъ сопротивленія, такъ что его величина будетъ

$$C = EpK.$$

Что касается измѣренія энергіи перемѣннаго тока, то тутъ слѣ-

дуетъ принимать во вниманіе особыя соображенія. Если съ цѣлью измѣрить количество энергіи, доставляемое двигателю или въ какую-нибудь другую часть цѣпи, питаемой перемѣнными токами, мы измѣримъ отдѣльно при помощи амперметра и вольтметра, амперы и вольты и затѣмъ перемножимъ ихъ, мы получимъ число *кажущихся ваттовъ* — величину часто значительно превосходящую число *истинныхъ ваттовъ*, что происходитъ вслѣдствіе существованія разности фазъ, существованіе которой, такъ сказать, не принимаетея во вниманіе измѣрительными инструментами. Истинное количество энергіи (истинное число ваттовъ) въ дѣйствительности равняется $W = CV \cos \varphi$, гдѣ C и V числа дѣйствующихъ вольтъ и амперъ, а φ—уголъ отставанія. Однако величина этого послѣдняго очень часто неизвѣстна. Потому приходится при подобныхъ измѣреніяхъ прибѣгать къ *ваттметрамъ*. Наиболѣе употребительная форма послѣднихъ—это электродинамометръ, устроенный такъ, чтобы катушка съ большимъ сопротивленіемъ была бы безъ самоиндукціи. Всегда, когда разность фазъ очень велика (происходитъ ли она отъ запаздыванія или упрежденія), энергія тока, отстающаго или упреждающаго вольты, будетъ мала. Токъ будетъ почти *безваттнымъ*. Таковъ напримѣръ случай, когда токъ проходитъ черезъ реагирующую катушку или конденсаторъ, если сопротивленіе цѣпи не велико.

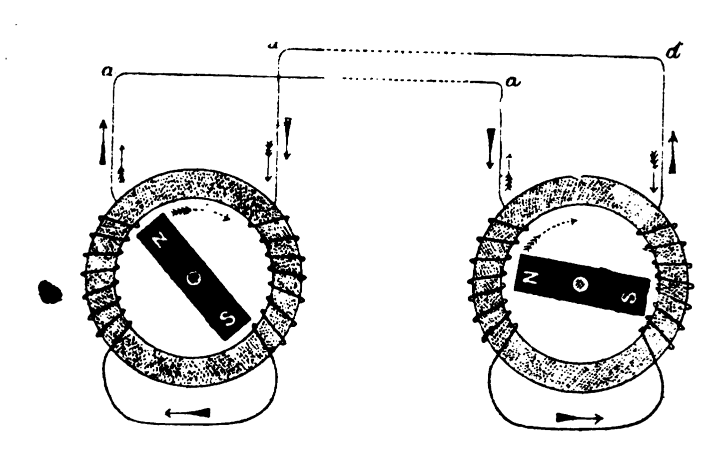
Многофазные генераторы.

Послѣ всего сказаннаго мы можемъ перейти къ разсмотрѣнію вопроса о многофазныхъ генераторахъ. Въ короткихъ словахъ принципъ устройства многофазныхъ генераторовъ состоитъ въ томъ, что арматура альтернатора снабжается катушками, сгруппированными серіями по двѣ, по три или больше, которыя начинаютъ дѣйствовать въ теченіе каждаго періода послѣдоватально одна послѣ другой.

До сихъ поръ мы предполагали, что индукторы альтернатора неподвижны, вращается же арматура. Но это не необходимо. Наоборотъ, въ большинствѣ альтернаторовъ, какъ однофазныхъ, такъ и многофазныхъ, принято обратное расположеніе: индукторы вращаются, а арматура неподвижна. Предпочтеніе, оказываемое такому расположенію органовъ машины, зависитъ отъ

сравнительной легкости изоляцiи обмотки арматуры, когда она неподвижна, а это очень важно, особенно когда для цѣлей передачи энергiи на большiя разстоянiя примѣняются высокiя напряженiя.

Фиг. 18.



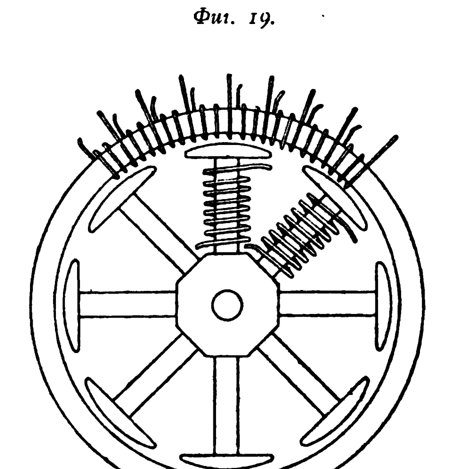
Передача энергiи отъ простого однофазнаго альтернатора къ простому синхронному двигателю.

Представимъ себѣ теперь—мы разсмотримъ простѣйшiй альтернаторъ съ неподвижной арматурой—кольцо съ двумя катушками, намотанными на двухъ противулежащихъ его частяхъ, внутри котораго вращается индукторъ, имѣющiй видъ прямого бруска съ двумя полюсами.

На фиг. 18 представлены двѣ такiя элементарныя машины, соединенныя двумя проводами, какъ бы для передачи энергiи. Одна служитъ генераторомъ и для ея вращенiя требуется или паровая машина, или тюрбина, другая вращается какъ синхронный двигатель. Какъ всѣмъ хорошо извѣстно такой двигатель самъ по себѣ не приходитъ во вращенiе. Чтобы онъ началъ вращаться, его надо сначала довести до опредѣленной скорости руками или какъ-нибудь иначе. Когда же онъ будетъ пущенъ такимъ образомъ въ ходъ, то уже онъ будетъ вращаться абсолютно синхронично съ генераторомъ и его электродвижущая сила будетъ почти противуположна по фазѣ электродви-

жущей силѣ генератора. Нѣкоторые изъ самыхъ первыхъ альтернаторовъ—Лонтена и Грамма—имѣли вращающіеся многополюсные индукторы и внѣшнюю неподвижную арматуру. Альтернаторы Грамма начали строиться около 1877 г. для питанія перемѣннымъ токомъ свѣчей Яблочкова. Чертежъ этой машины (фиг. 19) показываетъ, что она имѣетъ восемь вращающихся полюсовъ, поочередно сѣверныхъ и южныхъ. Арматура состоитъ изъ кольцевого сердечника, составленнаго изъ желѣзныхъ дисковъ, снабженнаго катушками изъ мѣдной проволоки, въ которыхъ индуктируется перемѣнный токъ.

Фиг. 19.



Альтернаторъ Грамма.

Оказывается (какъ мы сейчасъ увидимъ), что невыгодно дѣлать отдѣльныя катушки слишкомъ широкими. Наоборотъ, чѣмъ болѣе сблизить катушки каждой группы, тѣмъ лучше онѣ дѣйствуютъ. Поэтому на описываемой машинѣ должно было бы быть только восемь узкихъ катушекъ — по одной противъ каждаго полюса. Но тогда на сердечникѣ арматуры осталось бы слишкомъ много свободнаго мѣста. Граммъ и заполнилъ все свободное мѣсто другими катушками. Число секцій въ обмоткѣ арматуры стало такимъ образомъ въ четыре раза больше, чѣмъ число полюсовъ и получилась возможность сгруппировать ихъ такъ, чтобы они питали четыре отдѣльныя цѣпи. Ясно, что вращающіеся полюсы будутъ проходить передъ четырьмя сосѣдними секціями послѣдовательно, такъ что четыре образующихся тока будутъ отличаться *по фазѣ* одинъ отъ другого. Граммъ зналъ или нашелъ, что не слѣдуетъ соединять всѣ катушки между собой. Онъ

соединилъ между собой только тѣ, которыя всегда одновременно находились передъ полюсами. Такъ что въ арматурѣ получилось четыре отдѣльныхъ цѣпи, каждая состоящая изъ восьми секцій, соединенныхъ послѣдовательно. Эти четыре отдѣльныя обмотки соединялись съ четырьмя тоже отдѣльными внѣшними цѣпями, изъ которыхъ каждая питала опредѣленное число свѣчей Яблочкова. Альтернаторъ Грамма является такимъ образомъ несомнѣнно многофазнымъ генераторомъ, но также несомнѣнно что Граммъ никогда не пытался комбинировать токи разнящіеся по фазѣ для какой-нибудь полезной цѣли и даже нѣтъ никакихъ свѣдѣній о томъ, считалъ ли онъ такую комбинацію возможной. Наоборотъ онъ всегда отдѣлялъ цѣпи именно потому, что въ нихъ индуктировались токи, фазы которыхъ не совпадали.

Фиг. 20.

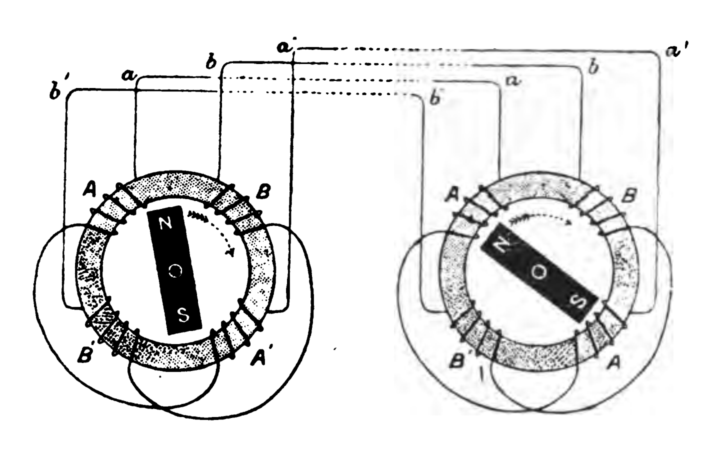
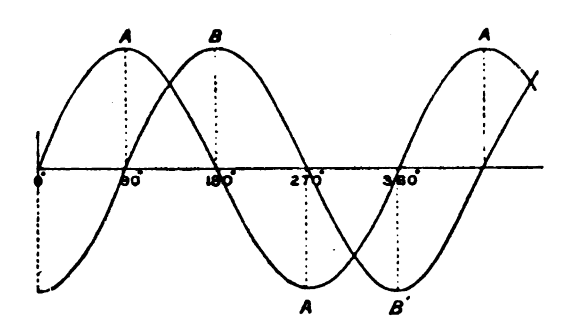


Схема двухфазной передачи энергіи.

Большіе двухфазные альтернаторы въ Паддингтонѣ, спроэктированные Гордономъ, начали работать въ 1883 г. Въ 1886 г. Виннъ (Wynne) предложилъ систему распредѣлительныхъ цѣпей, «по которымъ пропускались перемѣнные токи такъ, что, хотя быстрота перемѣнъ и была одинакова во всѣхъ, но моменты, когда происходили перемѣны направленія, были различны“.

Замѣтимъ, кстати, что въ каждомъ типѣ альтернатора, если его арматура намотана для однофазныхъ токовъ, на ней должны быть свободные промежутки. Если мы вернемся къ фиг. 18, то увидимъ, что на кольцѣ есть много свободнаго мѣста, которое съ пользою можно заполнить обмотками. Предположимъ, напримѣръ, что между катушками *A* и *A'* на каждой машинѣ намотаны еще двѣ катушки *B* и *B'* и что эти новыя катушки на двухъ машинахъ соединены новой парой проводовъ *b* и *b*

Фиг. 21



Два перемѣнные тока, разнящіеся на $^1/_4$ періода.

(фиг. 20). Ясно, что въ этихъ катушкахъ явится новый рядъ перемѣнныхъ токовъ, которые будутъ отставать отъ токовъ въ катушкахъ *A* и *A'* ровно на $^1/_4$ періода. Оба тока можно представить двумя волнообразными кривыми (фиг. 21). Электродвижущая сила въ *A* будетъ наибольшая какъ разъ въ тотъ моментъ, когда полюсъ магнита будетъ проходить передъ ея серединой, такъ какъ въ этотъ моментъ скорость измѣненія намагниченія ея сердечника будетъ наибольшая. Понятно, что положенія магнита, соотвѣтствующія максимумамъ индукціи въ *A* будутъ соотвѣтствовать нулевой индукціи въ *B* и наоборотъ. Два перемѣнныхъ тока, отличающихся такимъ образомъ по фазѣ на $^1/_4$ періода, называются токами, находящимися «въ квадратурѣ». Токи въ катушкахъ *A* двигателя, стремящіеся продвинуть впередъ полюсы индуктора, не будутъ еще равны нулю, когда появятся токи въ катушкахъ *B*, такъ что въ двигателѣ не будетъ мертвыхъ точекъ. Легко видѣть, что въ двигателѣ

будетъ происходить равномѣрное перемѣщеніе (вращеніе) результирующихъ полюсовъ по кольцу. Въ моменты, когда сила тока въ катушкахъ *AA'* будетъ наибольшая, сила тока въ катушкахъ *BB'* будетъ нуль и намагничивающее дѣйствіе *AA'* произведетъ въ кольцѣ два двойныхъ полюса на противуположныхъ концахъ діаметра, проходящаго черезъ середины катушекъ *BB'*. Когда токъ въ катушкахъ *AA'* начнетъ ослабѣвать, появится и начнетъ усиливаться токъ въ катушкахъ *BB'* и поэтому полюсы начинаютъ перемѣщаться впередъ. Когда силы токовъ въ катушкахъ *AA'* и *BB'* станутъ равны, то *A* и *B* начнутъ дѣйствовать вмѣстѣ какъ одна катушка, а A' и *B'*—какъ другая и полюсы будутъ находиться посрединѣ между *B* и *A'* справа и посрединѣ между *B'* и *A* слѣва. Когда токъ въ катушкахъ *BB'* достигнетъ максимума, полюсы будутъ находится на серединѣ катушекъ *A* и *A'*. Такимъ образомъ въ кольцѣ двигателя получится пара вращающихся полюсовъ, производимыхъ токами, доставляемыми генераторомъ и магнитъ двигателя будетъ все время стремиться притянуться къ этимъ перемѣщающимся полюсамъ. Въ двигателѣ не будетъ никакихъ мертвыхъ точекъ. Двигатель самъ придетъ во вращеніе, если только его магнитъ не будетъ слишкомъ силенъ, и скорость его будетъ увеличиваться до тѣхъ поръ, пока не будетъ достигнутъ синхронизмъ. Въ этомъ и состоитъ громадное преимущество многофазныхъ токовъ: они позволяютъ устраивать двигатели, которые сами приходятъ въ движеніе. Однако это не единственное качество многофазныхъ генераторовъ. Мы видѣли, что они позволяютъ удвоить количество мѣди на арматурѣ и, слѣдовательно, служатъ какъ генераторы двойной работоспособности [1]). Они правда будутъ требовать для своего вращенія вдвое больше паровыхъ силъ, но зато и сами дадутъ вдвое больше количество энергіи, причемъ вдобавокъ, не будутъ стоить вдвое дороже и будутъ занимать не больше мѣста чѣмъ однофазные. Слѣдуетъ

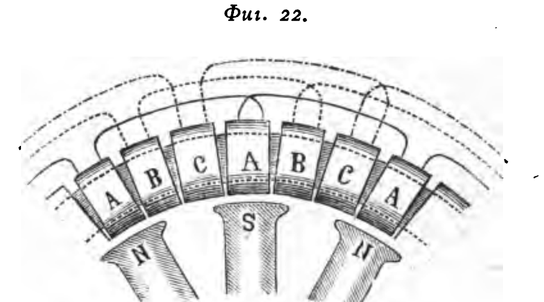
1) См. *H. Georges* „Сравнительная работоспособностъ арматуръ постояннаго, перемѣннаго и многофазнаго тока“, *Elektrotechnische Zeitschrift,* vol. XIII p. 236. Добровольскій при разборѣ этой статьи упоминаетъ объ одной многополюсной машинѣ постояннаго тока, дававшей 11000 ваттовъ. Тѣ же индукторы съ трехфазной арматурой дали 30000 ваттовъ.



замѣтить еще, что *реакціи арматуры въ двухфазномъ генераторѣ не больше, чѣмъ тѣ, которыя получились-бы, еслибы ту же машину употребить, какъ однофазный альтернаторъ.*

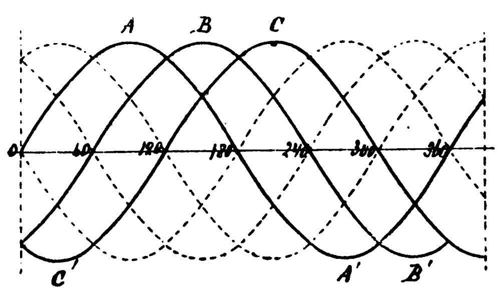
Предположимъ теперь, что вмѣсто того, чтобы устраивать двѣ отдѣльныя группы катушекъ, мы устроили ихъ три, какъ это и дѣлалъ на самомъ дѣлѣ Граммъ въ нѣкоторыхъ изъ своихъ машинъ небольшаго размѣра. При этомъ устройствѣ мы бы получили три тока, разнящихся другъ отъ друга по фазѣ. Если бы катушки были расположены въ арматурѣ такъ, какъ указано на фиг. 22, то мы бы могли соединить въ одну цѣпь катушки *A* (причемъ эти катушки должны быть или намотаны поочередно съ лѣва на право и съ права на лѣво или соединены соотвѣтствующимъ образомъ), въ другую катушки *B* и въ третью катушки *C*. Ясно, что въ каждой изъ этихъ цѣпей электродвижущая сила будетъ регулярно увеличиваться и уменьшаться и что элек-

Фиг. 22.



Трехфазный генераторъ.

Фиг. 23.

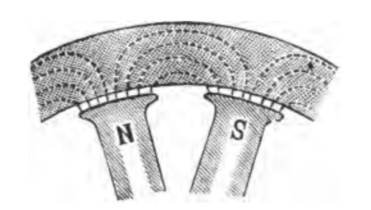


Трехфазные токи, разнящіеся по фазѣ на 60°.

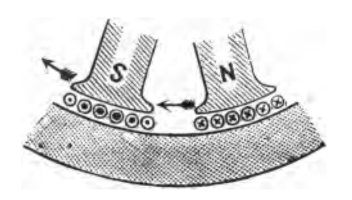
тродвижущая сила въ *B* не достигнетъ своего максимума до тѣхъ поръ, пока электродвижущая сила въ *A* не перейдетъ че-

резъ максимумъ и не начнетъ уменьшаться. Три получающіеся тока съ ихъ разностью фазъ могутъ быть изображены тремя кривыми, какъ на фиг. 23. Такъ какъ въ машинѣ угловое разстояніе отъ одного сѣвернаго полюса до слѣдующаго сѣвернаго же, соотвѣтствуетъ «полному періоду» (стр. 7) или полному обороту (360°) точки на вспомогательномъ кругѣ (фиг. 8), то ясно, что наши три тока будутъ разниться другъ отъ друга по фазѣ на 60°. Если бы мы устроили для каждой цѣпи отдѣльный прямой и обратный проводъ, то намъ бы пришлось для соединенія машины съ двигателемъ (3-хъ-фазнымъ), который она питаетъ, проложить 6 проводовъ. Но, какъ мы увидимъ дальше, можно, устроивъ соотвѣтствующія соединенія, уменьшить это число до

Фиг. 24.



Фиг. 25.

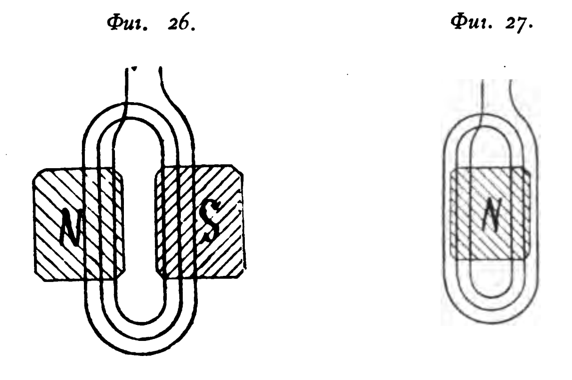


четырехъ и даже трехъ, а если примѣнить возвратъ черезъ землю, то число проводовъ можно уменьшить до двухъ.

Раньше, чѣмъ перейти къ разсмотрѣнію современныхъ многофазныхъ генераторовъ, мы должны посвятить нѣсколько времени изученію вліянія ширины катушекъ въ обмоткѣ арматуры. Возьмемъ вращающіеся многополюсные индукторы (фиг. 24), и предположимъ, что полюсные наконечники у нихъ имѣютъ такую форму, что образующееся въ промежуткѣ между ними и сердечникомъ арматуры магнитное поле вызываетъ въ каждомъ проводникѣ, въ немъ перемѣщающемся, электродвижущую силу, которую можно изобразить правильной волнообразной кривой Мы будемъ обозначать электродвижущія силы, направленныя *къ читателю* точками въ центрѣ сѣченія проводника, а электродвижущія силы, направленныя *отъ читателя*—крестиками. При расположеніи проводниковъ, указанномъ на фиг. 25, появится электродвижущая сила, направленная впередъ къ читателю въ тѣхъ

изъ нихъ, передъ которыми проходилъ слѣва направо южный полюсъ. Эти электродвижущія силы не будутъ, однако, равны во всѣхъ сосѣднихъ проводникахъ: они будутъ больше въ тѣхъ, которые болѣе активны т. е. въ тѣхъ, которые проходятъ черезъ наиболѣе сильное магнитное поле. Каждый проводникъ пройдетъ черезъ тотъ же циклъ индукціонныхъ явленій, но очевидно, что максимумъ этихъ явленій наступаетъ послѣдовательно сначала въ одномъ, потомъ въ другомъ и т. д. Для удобства мы предположимъ, что этотъ максимумъ наступаетъ въ каждомъ проводникѣ тогда, когда передъ нимъ проходитъ середина полюснаго наконечника. Если теперь (какъ это и дѣлается на самомъ дѣлѣ) нѣсколько такихъ проводниковъ соединены послѣдовательно (фиг. 26), такъ-что они образуютъ катушку, то въ той катушкѣ электродвижущія силы, индуктированныя въ отдѣльныхъ про-

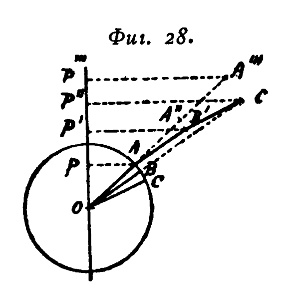
Фиг. 26. *Фиг. 27.*



водникахъ, будутъ складываться. Мы представимъ себѣ все это яснѣе, если взглянемъ на черт. 26, гдѣ два полюса, движущіеся слѣва на право, изображены позади катушки. Черезъ нѣкоторый промежутокъ времени, позади катушки очутится одинъ сѣверный полюсъ (фиг. 27). Этотъ рисунокъ показываетъ, что нѣтъ выгоды имѣть катушки другъ отъ друга на разстояніи меньшемъ, чѣмъ ширина полюснаго наконечника, такъ какъ въ этотъ моментъ электродвижущія силы въ отдѣльныхъ проводникахъ ихъ составляющихъ направлены въ противуположныя стороны. Принимая во вниманіе распредѣленіе магнитнаго поля, выгоднѣе

даже дѣлать катушки болѣе узкими, чѣмъ полюсные наконечники. Электродвижущая сила въ катушкѣ изъ опредѣленнаго числа оборотовъ проволоки будетъ тѣмъ больше, чѣмъ они ближе подходятъ одинъ къ другому, такъ, чтобы наибольшая индукція въ нихъ была бы въ одинъ и тотъ же моментъ.

Фиг. 28.



Сказанное можно сдѣлать болѣе яснымъ, если прибѣгнуть къ часовой діаграммѣ. Предположимъ, что наибольшая электродвижущая сила, развивающаяся въ одномъ изъ проводниковъ изображается радіусомъ OA (фиг. 28). Проэкція этого радіуса, на вертикальный діаметръ, т. е. длина OP, даетъ величину электродвижущей силы въ моментъ, когда уголъ AOP соотвѣтствуетъ фазѣ индукціи. Пусть другіе проводники будутъ расположены нѣсколько впереди, такъ что ихъ электродвижущія силы будутъ изображены радіусами OB и OC. Постараемся найти, какова будетъ общая электродвижущая сила этихъ проводниковъ, если ихъ всѣхъ соединить послѣдовательно. По общему правилу для сложенія величинъ, имѣющихъ направленіе (векторовъ), мы найдемъ ихъ равнодѣйствующую, проведя изъ точки A прямую AB' равную и параллельную OB, изъ точки B'—прямую $B'C'$ равную и параллельную OC и соединя точки O и C'. Прямая OC' и изобразитъ получающуюся наибольшую электродвижущую силу, а ея проэкція на вертикальную прямую,—величину электродвижущей силы получающейся отъ соединенія трехъ проводниковъ, въ разсматриваемый моментъ. Если бы всѣ они были очень близки другъ къ другу, такъ что не было бы никакой разности фазъ, то суммарная наибольшая электродвижущая сила была бы OA''', а электродвижущая сила въ разсматриваемый моментъ равная проэкціи OA''' на вертикальную линію, была бы OP'''.

Полезно пояснить сказанное численнымъ примѣромъ. Положимъ что въ каждомъ проводникѣ появляется электродвижущая сила-дѣйствующая величина которой равняется 1 вольту. Если три такихъ проводника соединить послѣдовательно, то получающаяся электродвижущая сила будетъ равна 3 вольтамъ только тогда,

когда эти проводники расположены другъ къ другу такъ близко, что электродвижущая сила достигаетъ въ нихъ максимума одновременно. Малѣйшее разстояніе между ними *должно* понижать получающуюся отъ ихъ соединенія электродвижущую силу.

Понятно, что крайне полезно вычислить коэффиціентъ пониженія, зависящій отъ ширины катушки, для всякой угловой величины этой катушки. Будемъ буквой ψ обозначать разность фазъ между середнимъ проводникомъ катушки и крайними ея проводниками съ обѣихъ сторонъ. Если машина снабжена двухполюснымъ магнитомъ, то величина ψ равняется просто половинѣ угловой ширины (выраженной въ радіанахъ) катушки. Если машина многополюсная, имѣющая напримѣръ p паръ полюсовъ, то уголъ разности фазъ ψ будетъ равняться половинѣ угловой ширины умноженной на p. Если линейная ширина катушки, измѣренная по окружности, равняется b, а діаметръ машины—d, то уголъ ψ (разность фазъ соотвѣтствующая половинѣ ширины) будетъ

$$\psi = \frac{p}{d}$$

Средняя величина дѣйствующей электродвижущей силы для всѣхъ проводниковъ, занимающихъ ширину катушки, выразится формулой

$$\frac{1}{\psi}\int_0^{\psi} e \cos\gamma d\gamma$$

гдѣ e —величина дѣйствующей электродвижущей силы въ какомъ нибудь проводникѣ, а γ разность фазъ электродвижущихъ силъ въ среднемъ проводникѣ катушки и въ этомъ проводникѣ. Если мы назовемъ ту часть этого выраженія, которая зависитъ отъ ψ, «коэффиціентомъ ширины» и обозначимъ его буквой q, то, по интегрированіи, получимъ:

$$q = \frac{\sin \psi}{\psi}$$

Чтобы, для ясности, привести нѣсколько численныхъ величинъ этого коэффиціента, вычислимъ его для нѣсколькихъ машинъ, устройство которыхъ будетъ описано дальше.

Напримѣръ, для арматуры съ кольцевой обмоткой, состоящей изъ четырехъ катушекъ, занимающей каждая цѣлый квадрантъ (какъ это бываетъ въ нѣкоторыхъ двухфазныхъ двигателяхъ см. фиг. 49), величины ψ и q будутъ:

$$\psi = 45^0 = 0{,}785 \text{ радіановъ}$$
$$q = 0{,}90.$$

Для арматуры съ кольцевой же обмоткой, но состоящей изъ трехъ катушекъ, занимающихъ каждая пространство въ 120° (см. фиг. 54):

$$\psi = 60^\circ = 1{,}05 \text{ радіана}$$
$$q = 0{,}82.$$

Для арматуры съ кольцевой обмоткой, состоящей изъ шести катушекъ, занимающихъ каждая 60° (см. фиг. 57):

$$\psi = 30^\circ = 0{,}523 \text{ радіана}$$
$$q = 0{,}95.$$

Для примѣра разсмотримъ еще двухфазный многополюсный генераторъ, въ которомъ проводники, составляющіе обмотку арматуры, вставлены въ отверстія въ дискахъ сердечника. Эти отверстія равномѣрно распредѣлены по окружности, притомъ такъ, что между двумя сосѣдними одноименными полюсами (напр. сѣверными) ихъ помѣщается 12. Въ этомъ случаѣ шесть проводниковъ принадлежатъ току одной фазы, шесть—другой и притомъ въ каждой группѣ въ трехъ проводникахъ токъ идетъ въ одномъ направленіи, въ трехъ—въ другомъ. Три проводника одной группы занимаютъ четверть всей ширины, т. е. занимаемое ими пространство соотвѣтствуетъ углу въ 90° на вспомогательномъ кругѣ. Такъ какъ проводники заключены въ каналахъ, то угловое дѣйствующее разстояніе между двумя крайними проводниками, изъ трехъ, равняется 60°, а половина его 30°. Слѣдовательно $q = 0{,}95$.

Фиг. 29.

Раньше, чѣмъ покончить съ вопросомъ о сложеніи электродвижущихъ силъ, фазы которыхъ не одинаковы, замѣтимъ, что

принципъ сложенія векторовъ, [1]), который мы примѣнили, ведетъ къ очень простому результату, если складываются двѣ электродвижущія силы. Пусть (фиг. 29) OP изображаетъ одну изъ нихъ, OQ—другую. Тогда разность фазъ между ними изобразится угломъ POQ, который мы обозначимъ черезъ φ. Складывая эти силы обыкновеннымъ образомъ, т. е. проводя прямую PR равную и параллельную OQ, получимъ равнодѣйствующую OR, которая представитъ величину и фазу результирующей электродвижущей силы. Изъ геометріи извѣстно, что

$$OR=\sqrt{OP^2+OQ^2+2OP\times OQ\cos\varphi}.$$

Это выраженіе очевидно будетъ наибольшимъ, когда $\cos\varphi=1$ или уголъ $\varphi=0$, т. е. когда разности фазъ нѣтъ.

Современные многофазные альтернаторы.

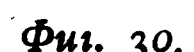
Мы теперь достаточно подготовлены для того, чтобы начать ознакомленіе съ нѣсколькими современными многофазными машинами.

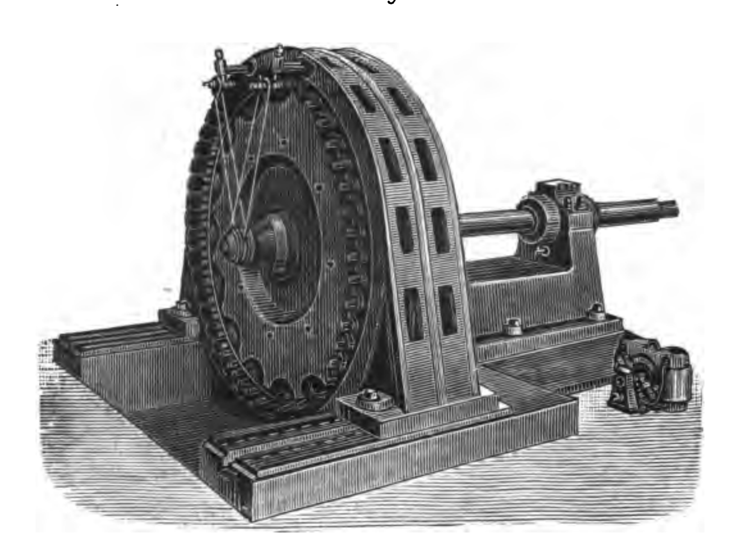
Начнемъ съ трехфазныхъ генераторовъ, работающихъ въ Лауффенѣ. Они приводятся въ движеніе тюрбинами, постановленными на Неккерѣ и установлены въ 1891 г. для снабженія токомъ города Гейльборна, находящагося отъ Лауффена на разстояніи 6 миль. Однако они были раньше всего примѣнены для знаменитой, ставшей исторической, передачи энергіи изъ Лауффена во Франкфуртъ, находящійся отъ него на разстояніи 110 миль, устроенной на время электрической выставки. Эти генераторы построены Цюрихскимъ заводомъ Эрликонъ по проэкту инж. Броуна. Ихъ неподвижная внѣшняя арматура снабжена зигзагообразной обмоткой, составленной изъ проводниковъ, помѣщенныхъ въ отверстія, продѣланныя въ сердечникѣ. Вращающіеся индукторы помѣщены внутри арматуры. На фиг. 30 представленъ внѣшній видъ машины, а на фиг. 31 видъ индукторовъ, когда арматура удалена. Машина даетъ три тока, каждый въ 1400 амперъ и приблизительно 50

*) См. *Thomson and Tait* «Treatise on Natural Philosophy» Vol. 1 § 58.



вольтъ. Она требуетъ на свое вращеніе со скоростью 150 оборотовъ въ минуту 300 силъ. Внѣшній діаметръ арматуры равняется 189,4 сант. (около 6 фут.), внутренній 176,4. Общая толщина сердечника, параллельно валу, равняется 38,0 сант. Вблизи внутренней периферіи въ сердечникѣ продѣлано 96 круглыхъ цилиндрическихъ каналовъ въ 33 мил. въ діаметрѣ, на разстояніи 60 мил.


Фиг. 30.

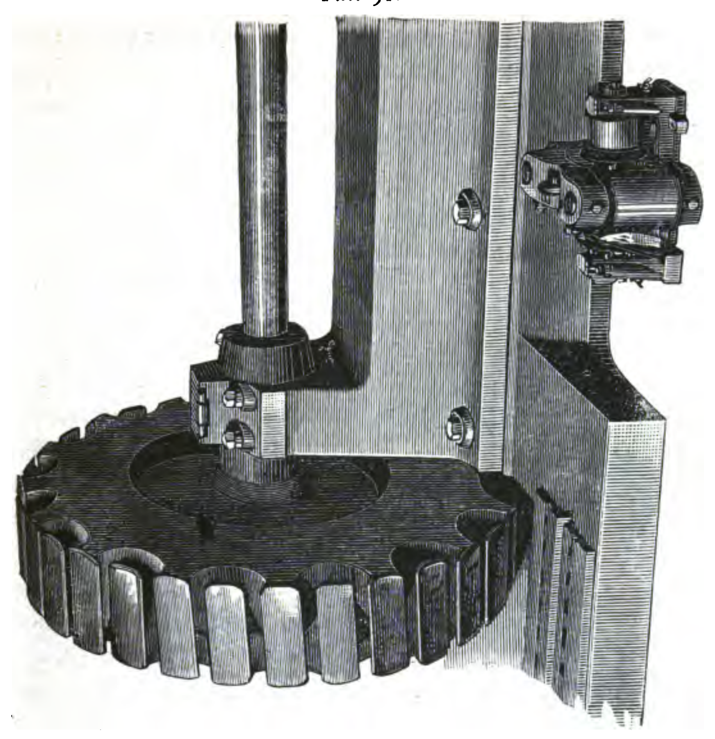


Трехфазный альтернаторъ Броуна, установленный въ Лауффенѣ.

одинъ отъ другого. Въ каждый изъ этихъ каналовъ помѣщена азбестовая трубка, внутри которой вставленъ сплошной мѣдный стержень въ 29 мил. въ діаметрѣ. Части сердечника, имѣющія форму сегментовъ, штампованныя изъ листового желѣза, помѣщены въ прочную чугунную раму. Обмотка, если ее можно такъ назвать, состоитъ изъ трехъ отдѣльныхъ частей, причемъ каждая изъ нихъ образована 32 стержнями, соединенными между собою зигзагообразно, по слѣдующей схемѣ:

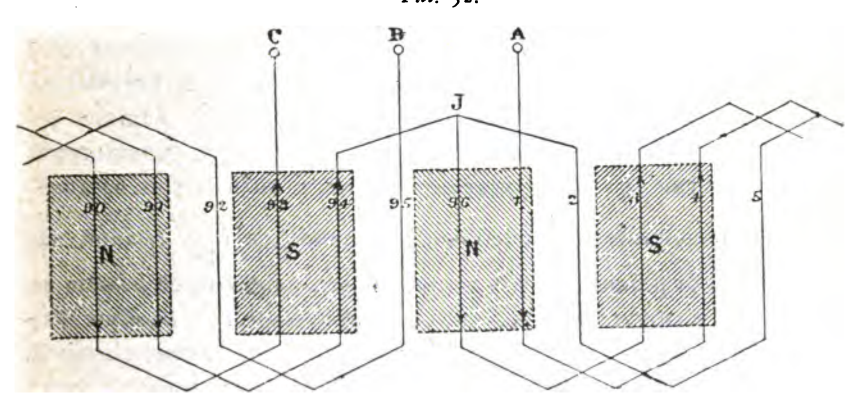
Группа *A*	1, 4, 7, 10 . . . 91, 94
Группа *B*	95, 92, 89, 86 . . . 5, 2
Группа *C*	93, 90, 87, . . . 3, 96

Фиг. 31.



Индукторы Лауффенскаго трехфазнаго альтернатора.

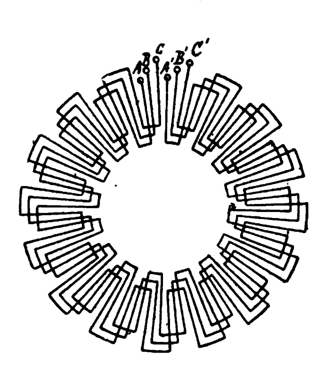
Фиг. 32.



Развернутая схема обмотки трехфазнаго альтернатора.

Концы нумеровъ 94, 2 и 96 соединены вмѣстѣ въ точкѣ *J*, концы же нумеровъ 1,95 и 93 присоединены каждый къ отдѣльному внѣшнему зажиму. Такимъ образомъ получается звѣздообразная обмотка (см. стр. 43). На фиг. 32 видны указанныя соединенія, общая же схема обмотки показана на фиг. 33.

Фиг. 33.

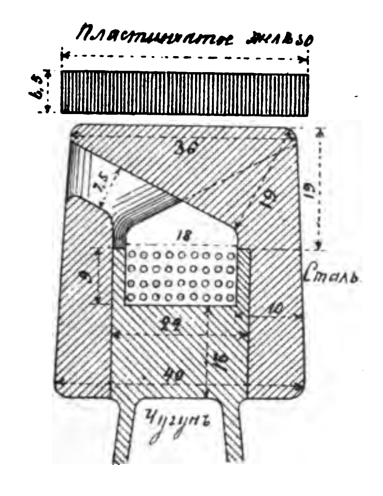


Обмотка трехфазнаго альтернатора.

Междужелѣзное пространство т. е. пространство между сердечникомъ арматуры и полюсными наконечниками индукторовъ, имѣетъ толщину въ 6 мил. Индукторы — 32 полюсные, съ одной магнитной цѣпью. Эти индукторы отличаются прочностью и простотой устройства. Намагничивающая катушка намотана въ горлѣ, устроенномъ на окружности особаго чугуннаго шкива, къ бокамъ котораго привинчены стальныя щеки, каждая снабженная 16 полюсными наконечниками. Поверхность каждаго изъ этихъ наконечниковъ 36 × 16 кв. сант. Горло, въ которомъ помѣщена намагничивающая катушка, имѣетъ 18 сант. въ ширину и 9 сант. въ глубину. Въ немъ помѣщается 496 оборотовъ мѣдной проволоки въ 5 мил. въ діаметрѣ. На фиг. 34 представленъ разрѣзъ части индукторовъ около периферіи, на фиг. 35 показано, какъ лежатъ въ перемѣнномъ порядкѣ полюсные наконечники *N* и *S*, прикрывая собою намагничивающую катушку. Такое устройство доводитъ расходъ на постройку и на возбужденіе машины до минимума. Дѣйствительно, въ этой машинѣ при разомкнутой внѣшней цѣпи на возбужденіе тратится только 100 ваттовъ, т. е. $\frac{1}{20}$ процента работоспособности машины, а при полной нагрузкѣ, когда реакція арматуры достигаетъ наибольшей величины, затрата на возбужденіе все таки далеко меньше 1%. Возбуждающій токъ доставляется маленькой вспомогательной динамомашиной. Этотъ токъ передается во вращающуюся часть посредствомъ двухъ гибкихъ металлическихъ шнуровъ, соединяющихъ два изолирован-

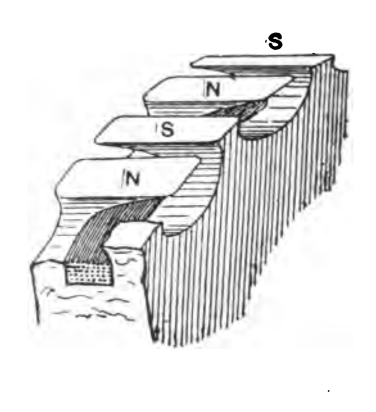
ныхъ шкивика, и замѣняющихъ обыкновенныя щетки. При полной скорости и нормальномъ числѣ вольтъ, потери на треніе и гистерезисъ достигаютъ 3600 ваттовъ, т. е. меньше 1,7% всей энергіи, доставляемой машиной. Потери, вызываемыя сопротивленіемъ арматуры при полной нагрузкѣ, достигаютъ 3500 ваттовъ. Всѣ потери вмѣстѣ не превышаютъ 4% и промышленная отдача машины больше 95%. Нагрѣваніе, вслѣдствіе полнаго отсутствія паразитныхъ токовъ, очень ничтожно. Вѣсъ машины равенъ 4,5-

Фиг. 34.



Разрѣзъ индукторовъ.

Фиг. 35.



Видъ части индуктора.

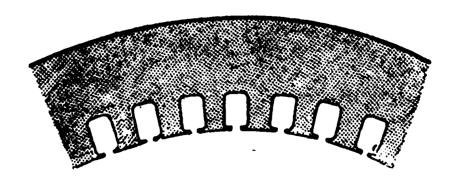
тонны. Такъ какъ у нея 16 паръ полюсовъ, вращающихся со скоростью 150 оборотовъ въ минуту, то частота тока равняется 40 періодамъ въ секунду. Электродвижущая сила, образующаяся въ каждой изъ трехъ обмотокъ и измѣряемая между общимъ соединительнымъ зажимомъ и соотвѣтствующимъ внѣшнимъ зажимомъ, можетъ быть доведена до 55 вольтъ.

Въ помѣщаемой ниже таблицѣ приведены нѣкоторыя данныя, касающіяся этой машины, полученныя комиссіей экспертовъ подъ предсѣдательствомъ проф. Вебера въ 1891 г.

Число силъ тюрбины.	Число электр. силъ производим. альтернаторомъ.	Число потерянныхъ силъ.	Отдача въ проц.	Сила тока въ каждой цѣпи.	Вольты между общ. зажимомъ и внѣшними.	Число обор. въ минуту.
87,4	75,1	12,3	88	336	54,7	150
120,1	107,5	12,6	90	470	56,1	150
154,7	142,2	12,5	92	644	54,2	149,7
167,2	154,4	12,8	92,6	677	55,9	149,5

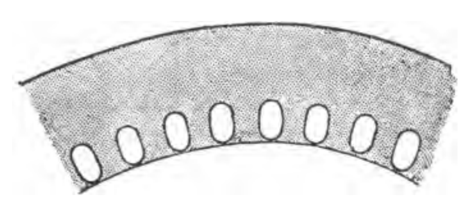
Испытанія не производились при полной нагрузкѣ, но эксперты замѣтили, что, если предположить, что потери будутъ возрастать въ томъ же отношеніи, какъ онѣ возрастали при опытахъ (см. таблицу), то отдача при полной нагрузкѣ (при 300 силахъ) достигнетъ 95,4%.

Фиг. 36.



Устройство арматуры въ этой машинѣ заслуживаетъ особеннаго вниманія. Брауну принадлежитъ честь введенія въ практику укладки проводниковъ въ каналы, высверленные въ сердечникѣ. Въ настоящее время почти во всѣхъ многофазныхъ машинахъ, генераторахъ или двигателяхъ, безразлично, проводники помѣщаются или въ такихъ каналахъ или въ глубокихъ желобахъ. Зубчатые сердечники, подобные изображенному на фиг. 36, въ настоящее время примѣняются почти во всѣхъ американскихъ динамомашинахъ и двигателяхъ. Цилиндри-

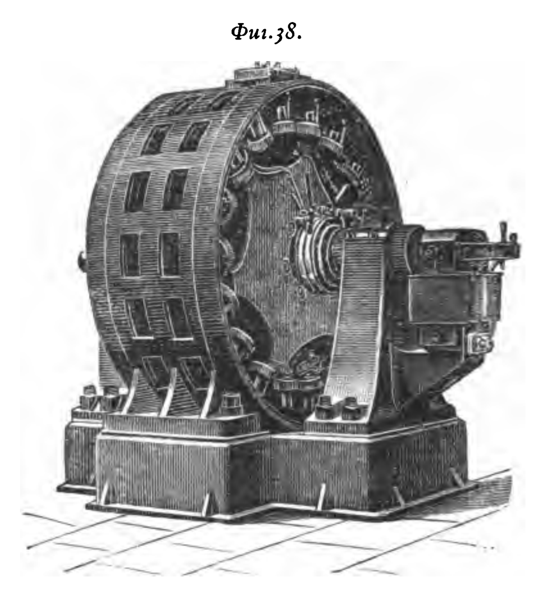
Фиг. 37.



ческіе же каналы—въ швейцарскихъ. Заводъ Эрликонъ примѣняетъ каналы съ круговымъ сѣченіемъ; заводъ Brown, Boveri & Co въ Баденѣ (Швейцарія) иногда тоже примѣняетъ такіе каналы, но чаще въ машинахъ этого завода примѣняются каналы съ эллиптическими сѣченіями въ 50 мил. длиной и 20 мил. шириной, (фиг. 37) причемъ для изоляціи употребляются толстыя трубки того же сѣченія, приготовляемыя изъ особеннымъ образомъ обработанной бумажной массы.

Помѣщеніе проводниковъ въ желѣзо имѣетъ много достоинствъ. Во-первыхъ въ механическомъ отношеніи конструкціи улучшается такъ какъ проводники при этомъ держатся прочно и для ихъ укрѣпленія не нужно никакихъ обручей. Далѣе центробѣжная сила не смѣщаетъ ихъ и слѣдовательно пространство между подвижной и неподвижной частью машины можетъ быть сдѣлано гораздо уже, отчего уменьшается затрата на возбужденіе. Но еще большее значеніе имѣютъ слѣдующія два достоинства: Въ проводникахъ, заключенныхъ внутрь желѣза, нѣтъ паразитныхъ токовъ и поэтому они не должны быть составными, а могутъ быть сплошными стержнями. Точно также проводники не испытываютъ тангенціальнаго притяженія, производимаго магнитнымъ полемъ: это притяженіе испытываетъ желѣзо, а не мѣдь.

Фиг. 38.



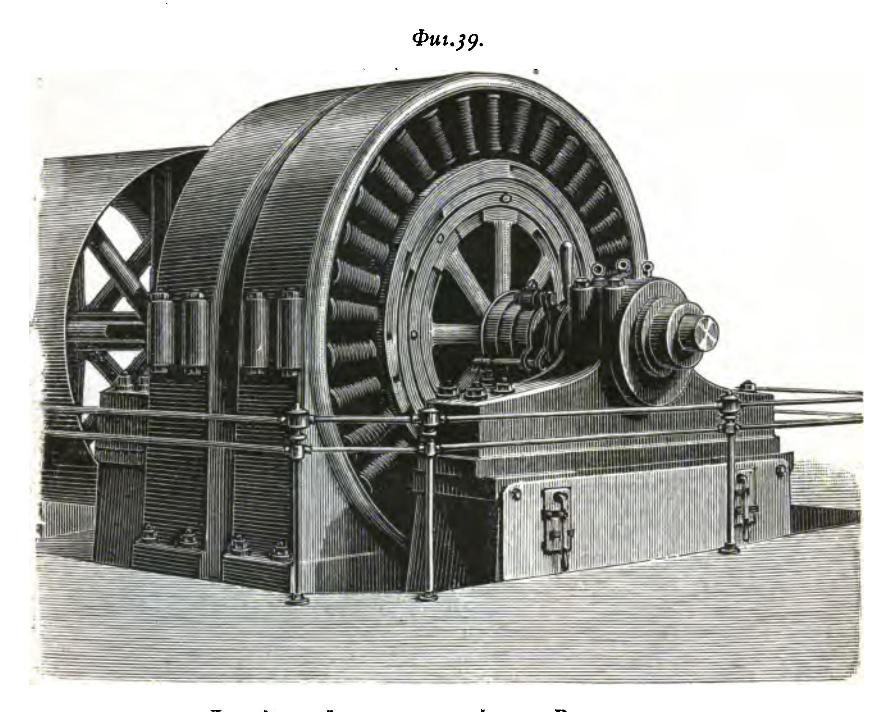
Многофазный генераторъ фирмы Эрликонъ.

Болѣе современный трехфазный генераторъ, устраиваемый компаніей Эрликонъ, въ общемъ имѣетъ такую же арматуру и такіе же индукторы, какъ только что описанный, но въ нихъ

сдѣланы нѣкоторыя детальныя улучшенія. Онъ описанъ въ третьемъ англійскомъ (1894) изданіи труда Каппа: «Электрическая передача энергіи». Внѣшній его видъ изображенъ на фиг. 38.

Въ качествѣ второго образца многофазныхъ генераторовъ, мы опишемъ большую 1000 сильную машину компаніи Вестингауза (въ Питсбургѣ), бывшую на выставкѣ въ Чикаго. Эта машина, представленная на фиг. 39, должна быть сравнена съ изображен-

Фиг. 39.



Двухфазный генераторъ фирмы Вестингауза.

ной на фиг. 2. Это на самомъ дѣлѣ двойная машина, имѣющая пару совершенно одинаковыхъ индукторовъ, помѣщенныхъ рядомъ на общемъ валу, внутри двухъ одинаковыхъ арматуръ. Но арматуры «сдвинуты» одна относительно другой, т. е. онѣ помѣщены такъ, что одна изъ нихъ сдвинута относительно другой на уголъ равный половинѣ углового разстоянія между сосѣдними полюсами *N* и *S*. Простымъ поворотомъ одной изъ арматуръ

изъ этой машины можно сдѣлать простой однофазный альтернаторъ. При такомъ устройствѣ машины, принятіе двухфазной системы не сопровождается никакой экономіей ни въ мѣстѣ, занимаемомъ машиной, ни въ матеріалѣ, идущемъ на ея постройку. Работоспособность описываемаго альтернатора равняется 750 киловаттамъ; частота тока — при 200 оборотахъ въ минуту — равняется 60 періодамъ въ секунду. Индукторы состоятъ, каждый, изъ 36 полюсныхъ выступовъ, сдѣланныхъ изъ листовой мягкой стали, укрѣпленныхъ на внѣшней соединительной части. На каждой арматурѣ тоже 36 зубцовъ, между которыми помѣщены и укрѣплены катушки арматуры, намотанныя, какъ было описано раньше.

Нѣсколько лѣтъ тому назадъ Вильямъ Стэнли устроилъ двухфазный альтернаторъ особаго типа, въ которомъ обмотки, какъ арматуры, такъ и индукторовъ, неподвижны, вращаются же только особыя желѣзныя части.

Лондонская Компанія «*Bruch Electrical Engineering Company*» устроила двухфазный альтернаторъ извѣстнаго типа машинъ Морди, измѣнивъ только арматуру. Именно, чтобы передвинуть половину катушекъ на половинную ширину одной катушки, сняли двѣ катушки на противуположныхъ концахъ одного и того же діаметра. Подобное же измѣненіе позволяетъ сдѣлать изъ машины Морди трехфазный альтернаторъ.

Совершенно также можно приспособливать и новѣйшіе альтернаторы Каппа.

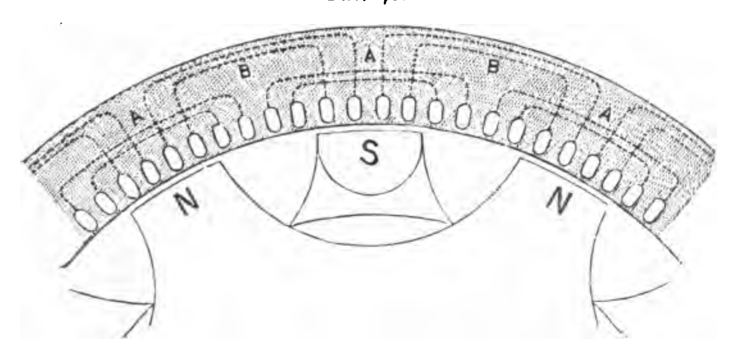
Въ послѣдніе года много различныхъ формъ многофазныхъ альтернаторовъ было введено въ практику фирмой *Brown, Boveri & C°* въ Швейцаріи. Всѣ они спроэктированы Броуномъ, бывшимъ прежде инженеромъ на заводѣ Эрликонъ.

Многія изъ этихъ машинъ отличаются отъ обыкновенныхъ альтернаторовъ только тѣмъ, что катушки, составляющія обмотку ихъ арматуръ, раздѣлены на двѣ или на три группы, такъ, чтобы онѣ давали двухфазный или трехфазный токъ.

Въ самое послѣднее время Броунъ придумалъ новую форму индукторовъ, имѣющихъ рядъ выступающихъ наружу полюсныхъ наконечниковъ. Особенность ихъ состоитъ въ томъ, что полюсные наконечники только черезъ одинъ снабжены обмоткой

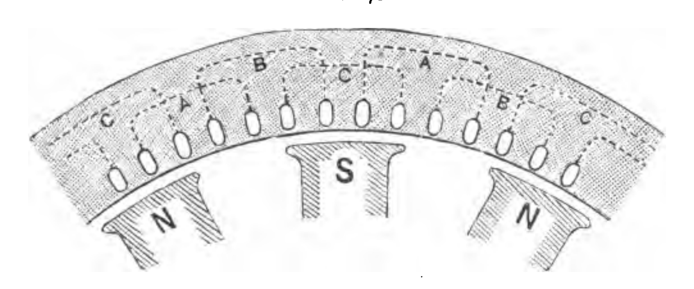
промежуточные же, имѣющіе сѣченіе большее, чѣмъ наконечники съ обмоткой, остаются голыми. Еще одна особенность, введенная Броуномъ въ устройство обмотокъ альтернаторовъ 2-хъ, 3-хъ и однофазныхъ, которая также примѣняется и въ обмоткахъ двигателей, состоитъ въ томъ, что соединительныя проволоки, т. е. про-

Фиг. 40.



волоки, соединяющія концы проводниковъ, выходящихъ изъ сердечника, располагаются въ различныхъ плоскостяхъ. Это устройство соединеній видно на фиг. 106^ter^ и на фиг. 171. Хотя это и деталь— однако деталь очень важная, т. к. это устройство уменьшаетъ возможность образованія короткаго замыканія. На черт. 40 это

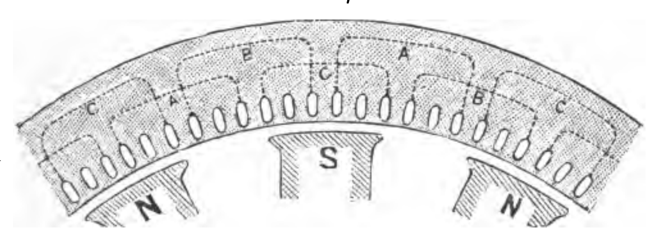
Фиг. 41.



устройство соединеній изображено схематически. На немъ видно, какъ можно соединить обѣ группы катушекъ *A* и *B* въ двухфазномъ генераторѣ такъ, чтобы для каждой петли воспользоваться двумя рядомъ лежащими отверстіями. Такое устройство имѣетъ нѣкоторое преимущество сравнительно съ тѣмъ, когда пользуются

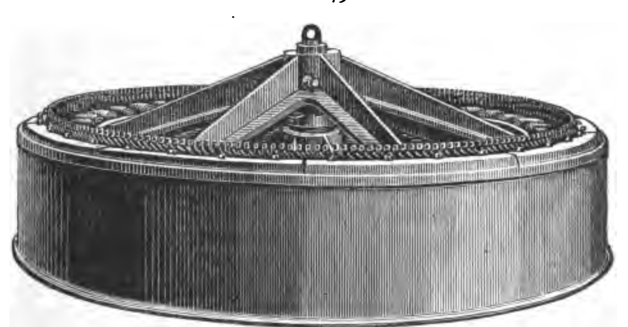
однимъ отверстіемъ большихъ размѣровъ, т. к. при послѣднемъ устройствѣ будетъ большее дѣйствіе на магнитную цѣпь, и полюсныя части индукторовъ будутъ грѣться сильнѣе. Кромѣ того, т. к. эти отверстія будутъ глубже въ радіальномъ направленіи, то магнитная утечка будетъ больше.

Фиг. 42.



На фиг. 41 показано примѣненіе описываемаго способа соединенія къ обмоткѣ трехфазнаго альтернатора, причемъ соединительныя части будутъ лежать въ двухъ плоскостяхъ. Катушки *A*

Фиг. 43.



Зонтикообразный альтернаторъ Броуна.

Фиг. 43bis.



Индукторъ зонтикообразнаго альтернатора.

будутъ конечно соединены послѣдовательно и соединительныя части будутъ лежать то въ нижней, то въ верхней плоскости. То же будетъ и для катушекъ *B* и *C* (см. фиг. 106 ter.).

Фиг. 42 показываетъ, какъ можно примѣнить къ устройству трехфазнаго генератора (или двигателя) сердечникъ, въ которомъ обмотка не заполнитъ всѣхъ отверстій. Эта обмотка примѣнена была съ цѣлью избѣжать необходимости устраивать новую серію штамповальныхъ машинъ для приготовленія дисковъ, изъ которыхъ составляются сердечники. Магнитныя реакціи слабѣе, когда въ мѣстахъ, указанныхъ на чертежѣ, оставлены незанятые каналы, чѣмъ когда сердечникъ въ этихъ мѣстахъ не имѣетъ отверстій.

Броуну принадлежитъ также изобрѣтеніе типа генераторовъ съ вертикальнымъ валомъ, столь удобно примѣняемаго въ случаяхъ, когда для вращенія машины употребляются тюрбины. Въ настоящее время въ разныхъ мѣстахъ работаетъ уже много такихъ машинъ Одна изъ такихъ машинъ, трехфазный генераторъ, работаетъ уже нѣсколько лѣтъ въ Шененвертѣ въ Швейцаріи (близъ Ааро), снабжая токомъ двигатели большаго завода, и до сихъ поръ работаетъ отлично. Недавно въ городѣ Ааро устроена центральная станція, машины которой приводятся въ движеніе тюрбинами, питаемыми водой отъ рѣки Ааръ. Внѣшній видъ такого «зонтикообразнаго» генератора представленъ на фиг. 43. Его подвижная часть — въ изображенной на чертежѣ машинѣ индукторы съ большимъ числомъ выдающихся наружу полюсныхъ наконечниковъ (фиг. 43 bis)—вращается на валу, къ которому она прикрѣплена на крестовинѣ съ шестью спицами. Снаружи находится неподвижная арматура съ сердечникомъ, составленнымъ изъ дисковъ съ отверстіями, въ которыхъ помѣщены стержни, составляющіе обмотку, соединенныя на концахъ угловыми соединительными частями. Компанія Эрликонъ построила также большіе альтернаторы «зонтикообразнаго» типа для станцій въ Беллегардѣ, Бремгартенѣ и Гошфельденѣ. На фиг. 44 представленъ видъ этой послѣдней станціи. На рисункѣ видны три генератора, спроэктированные Броуномъ въ 1890 г. Это трехфазныя машины, каждая въ 200 силъ, вращающіяся со скоростью 180 оборотовъ въ минуту. Исключая вертикальнаго вала, который непосредственно соеди-



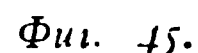
Фиг. 44. Трехфазные генераторы на центральной станціи въ Гошфельденѣ.

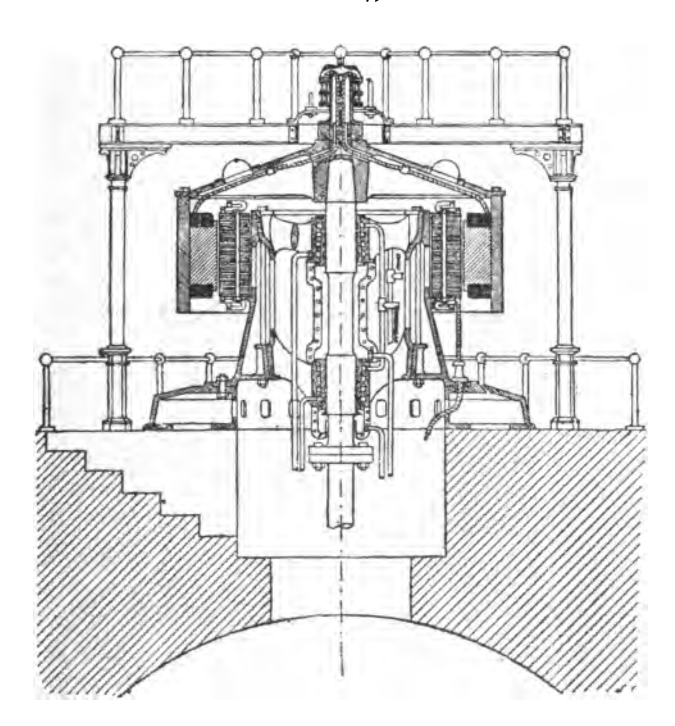
няется съ валомъ тюрбины, вращающей машину, эти генераторы во всемъ совершенно сходны съ Лауффенскими. Они даютъ разность потенцiаловъ у зажимовъ въ 86 вольтъ. Для повышенiя напряженiя, каждый генераторъ соединенъ съ трехфазными трансформаторами, погруженными въ масло. Одинъ изъ этихъ трансформаторовъ виденъ въ правой части рисунка. Эти трансформаторы подымаютъ напряженiе до 13000 вольтъ и получаемый отъ нихъ токъ по тремъ проводамъ передается на заводъ Эрликонъ (находящiйся на разстоянiи 24 километровъ), гдѣ напряженiе при помощи такихъ же трансформаторовъ понижается до 190 вольтъ, и токъ этого напряженiя примѣняется уже для освѣщенiя и движенiя.

Нiагарскiе альтернаторы. Когда возникла идея примѣнить водяную силу Нiагарскаго водопада, компанiя Cataract Construction предложила многимъ европейскимъ и американскимъ фирмамъ представить свои проекты. Машины должны были быть въ 5.000 силъ и дѣлать 250 оборотовъ въ минуту. Многiе изъ представленныхъ проектовъ были очень хороши, однако все-таки было рѣшено, что всѣ машины будутъ построены въ Америкѣ, такъ какъ пошлины и расходы по перевозкѣ были бы очень велики, если бы машины построили въ Европѣ. Многiя изъ проектированныхъ машинъ (въ томъ числѣ и проектированныя Броуномъ) были зонтикообразнаго типа. Однако, по многимъ причинамъ (главнымъ образомъ по причинѣ трудностей постройки возникающихъ вслѣдствiе большихъ размѣровъ машинъ и скорости, которую онѣ должны имѣть), проф. Форбсъ и Колеманъ Селлерсъ получили въ маѣ 1893 г. предложенiе составить новый проектъ машинъ указаннаго типа. Проф. Форбсъ остановился на зонтикообразномъ типѣ съ вращающимися внѣшними индукторами, сообщенными выступающими внутрь полюсными выступами, связанными стальными кольцами, такъ какъ эти индукторы одновременно и прочны, и исполняютъ отлично роль маховиковъ. Онъ раньше спроектировалъ двухфазныя машины съ восемью полюсами, дающiя токъ малой частоты, всего съ $16^2/_3$ перiодами въ секунду. Однако, когда постройка машинъ была поручена компанiи Вестингауза, то рѣшили окончательно допустить частоту въ 25 перiодовъ и сдѣлать обмотку въ 2.000 вольтъ. Рисунокъ

машины, напечатанный въ свое время проф. Форбсомъ [1]), относится къ первоначальному типу, имѣющему нѣкоторыя усложненія, становящіяся лишними, когда число вольтъ было понижено съ 30.000 вольтъ до 2.000.

На фиг. 45 изображена въ разрѣзѣ одна изъ Ніагарскихъ машинъ, построенныхъ въ дѣйствительности. Внѣшніе вращаю-





Разрѣзъ Ніагарскаго альтернатора въ 5000 силъ.

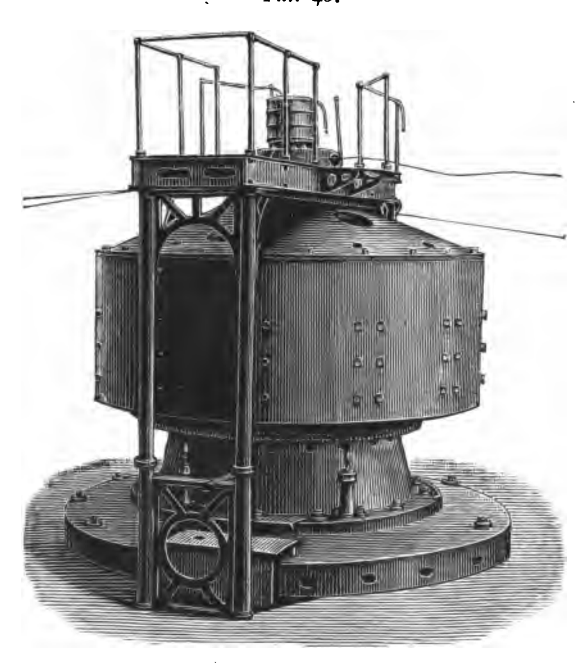
щіеся индукторы состоятъ изъ стального кольца, къ которому съ внутренней стороны привинчены двѣнадцать, направленныхъ внутрь, чугунныхъ полюсныхъ выступовъ. Кольцо съ выступами подвѣшено на крестовинѣ съ шестью спицами на вертикальномъ валу. Валъ проходитъ сквозь бронзовую подпорку, укрѣпленную

---

[1]) *«Journal of the Institution of Electrical Engineers»* Novem. 1893.

стоящей на фундаментномъ кольцѣ, на которой укрѣплена неподвижная арматура. Сердечникъ этой арматуры составленъ изъ сегментовъ, штампованныхъ изъ тонкаго листоваго желѣза, скрѣпленныхъ вмѣстѣ восемью болтами изъ никкелистой стали. На внѣшней сторонѣ сердечника находятся 187 желобковъ, въ которыхъ помѣщаются мѣдные провода. Число этихъ послѣднихъ равняется 374. Они прямоугольнаго сѣченія (32×8 милим.) и


Фиг. 46.



Ніагарскій генераторъ.

два такихъ проводника помѣщаются рядомъ въ каждомъ желобкѣ между зубцами сердечника. Для изоляціи примѣнена слюда. Всѣ эти проводники соединены при помощи согнутыхъ на четырехъ стойкахъ, которыми снабжено чугунное кольцо. Это кольцо само укрѣплено внутри внѣшней чугунной оболочки, соединительныхъ частей въ двѣ отдѣльныя цѣпи. Напряженіе тока доставляемаго альтернаторами равняется 2.250 вольтамъ,

сила же въ двухъ цѣпяхъ 775 амперамъ. Скорость вращенія равняется 250 оборотамъ въ минуту. Такъ какъ число полюсовъ равно 12, то частота тока равняется 25 періодамъ въ секунду. Обмотки индукторовъ питаются постояннымъ токомъ (доставляемымъ вращательнымъ трансформаторомъ), черезъ два кольца, укрѣпленныхъ на верхней части вала. На фиг. 46 представленъ внѣшній видъ такого генератора. Его высота равняется 13 футамъ (приблизительно 4 метрамъ).

Страсбургскіе генераторы. Трехфазные генераторы, построенные недавно для гор. Страсбурга Берлинской Allgemeine Gesellschaft, принадлежатъ къ типу съ неподвижной арматурой и неподвижными индукторами.

Асинхронные генераторы. Многими лицами, между прочимъ Броуномъ, было найдено, что асинхронные двигатели, какъ многофазные, такъ и однофазные, могутъ дѣйствовать какъ генеторы, если ихъ начать вращать со скоростью нѣсколько превосходящею скорость, соотвѣтствующую синхронизму (см. гл. VI § 5). Но, однако, нельзя питать цѣпь, если располагаютъ одной такой машиной, такъ какъ она не самовозбуждающаяся. Необходимо, чтобы въ цѣпи уже существовалъ токъ перемѣнный или многофазный. Вѣроятно для станцій, у которыхъ нагрузка склонна быстро мѣняться, было бы удобно вмѣстѣ съ другими генераторами имѣть одинъ или нѣсколько асинхронныхъ, такъ какъ асинхронный генераторъ можно вращать, какъ ненагруженный двигатель, со скоростью немного меньшей, соотвѣтствующей синхронизму, все время пока токъ отъ него не требуется. Въ нужный моментъ, если увеличить просто скорость вращающейся его машины (не ожидая «синхронизаціи»), онъ начнетъ работать какъ генетаторъ и давать электродвижущую силу, импульсы которой будутъ синхроничны съ импульсами въ цѣпи, хотя вращеніе генератора и не будетъ синхронично съ вращеніемъ другихъ питающихъ цѣпь машинъ.

При нѣсколькихъ опытахъ, произведенныхъ въ Швеціи Даніельсономъ [1]) въ 1892 году, трехфазный асинхронный двигатель

[1]) *Electrical World* (N. J.) Jan. 1893, p. 44. *Etectrical Review,* XXXII, p. 169. Febr. 1893.

былъ соединенъ съ трехфазнымъ синхроничнымъ генераторомъ. Затѣмъ первый приводился во вращеніе и служилъ генераторомъ, а послѣдній двигателемъ, который испытывался нажимомъ. При этихъ опытахъ было найдено, что асинхронная машина не будетъ давать тока, если цѣпь состоитъ только изъ сопротивленій (лампъ) или изъ сопротивленій съ самоиндукціей [1]).

[1]) Т. е. необходимо имѣть въ цѣпи трехфазный двигатель.

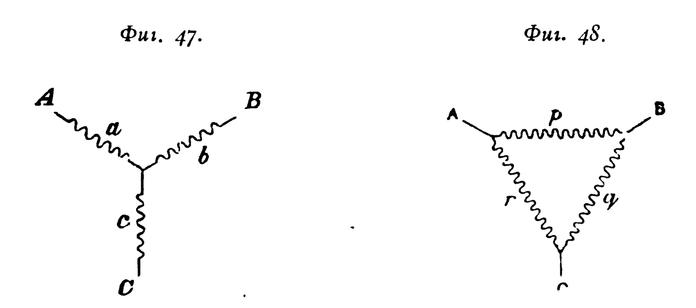
Прим. пер.

ГЛАВА II.

Комбинаціи многофазныхъ токовъ.

Раньше, чѣмъ возникла идея комбинировать токи различныхъ фазъ для привсденія во вращеніе двигателей, никто и не занимался изученіемъ способовъ соединенія въ системы отдѣльныхъ группъ катушекъ, въ которыхъ индуктируются электродвижущія силы различныхъ фазъ. Комбинаціи токовъ двухфазныхъ или трехфазныхъ обыкновенно разсматривались въ примѣненіи къ двигателямъ, но этотъ вопросъ можетъ быть также съ пользою разсмотрѣнъ и въ примѣненіи къ генераторамъ. Существуетъ

Фиг. 47. *Фиг. 48.*



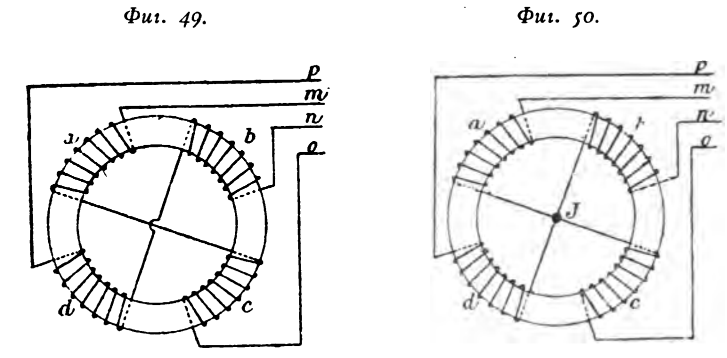
два главныхъ способа соединять между собою многофазныя цѣпи, которые можно назвать соединеніемъ *звѣздой* и соединеніемъ *многоугольникомъ*. При соединенін звѣздой, катушки, въ которыхъ производится или поглощается энергія, соединяются однимъ концомъ въ общей точкѣ, отъ которой они расходятся звѣздообразно каждая къ своей линіи. Сравненіе этихъ двухъ системъ лучше всего сдѣлать дли частнаго случая трехфазнаго тока. На фиг. 47 изображено соединеніе звѣздой трехъ

катушекъ *a*, *b* и *c*, предназначенныхъ для полученія тока поочередно. Токъ входитъ и идетъ къ центру сначала черезъ *a* (и выходитъ черезъ одну или обѣ катушки *b* и *c*), затѣмъ черезъ *b*, затѣмъ черезъ *c* и т. д. На фиг. 48 показано соединеніе трехъ катушекъ *p*, *q* и *r*—треугольникомъ. При такомъ соединеніи катушки образуютъ замкнутый треугольникъ, присоединенный къ цѣпямъ въ вершинахъ.

Существуетъ также нѣсколько болѣе сложныхъ способовъ соединенія, въ которыхъ одновременно примѣняются системы треугольника и звѣзды. На фиг. 60 показана одна изъ комбинацій этихъ системъ.

Ниже помѣщенные рисунки относятся къ простому двухфазному току. Тутъ слѣдуетъ разсмотрѣть нѣсколько отдѣльныхъ системъ соединенія.

Фиг. 49. *Фиг. 50.*



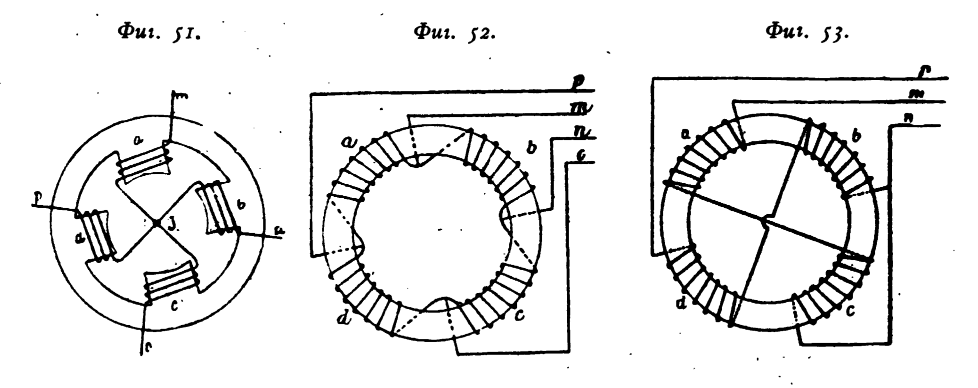
1) *Отдѣльныя обмотки*. Катушки на генераторѣ, токи въ которыхъ всегда находятся въ одинаковыхъ фазахъ, можно соединять вмѣстѣ по любому изъ способовъ, примѣняемыхъ въ однофазныхъ машинахъ. Точно также могутъ быть соединены между собою катушки, въ которыхъ индуктируются токи другой фазы. Такимъ образомъ получаются двѣ совершенно отдѣльныя цѣпи, какъ это показано на фиг. 49, гдѣ катушки *a* и *c* принадлежатъ къ одной цѣпи, соединенной съ проводами *m* и *o*, а катушки *b* и *d*—составляютъ другую, совершенно отдѣльную цѣпь, соединенную съ проводами *n* и *p*.

2) *Соединеніе звѣздой*. Катушки или группы катушекъ имѣютъ

каждая одинъ конецъ, присоединенный къ общей точкѣ соединенія *J*, образуя такимъ образомъ звѣзду. Свободные концы катушекъ присоединяются къ линейнымъ проводамъ, какъ это показано на фиг. 50 и 51. На фиг. 50 катушки намотаны на кольцѣ, на фиг. 51—на полюсныхъ выступахъ. Эти системы различаются только въ магнитномъ отношеніи, если же ихъ разсматривать просто какъ электрическія цѣпи, то окажутся совершенно одинаковыми.

3) *Соединеніе четыреугольникомъ.* Катушки можно соединить между собою такъ, что онѣ образуютъ замкнутую цѣпь, и можно присоединить линейные провода въ точкахъ соединенія катушекъ между собою, какъ это указано на фиг. 52, на которой изображено простое Граммовское кольцо, снабженное четырьмя катушками, мѣста соединенія которыхъ присоединены къ линейнымъ проводамъ, вмѣсто того, чтобы быть присоединенными къ коллектору изъ четырехъ пластинъ.

Фиг. 51. Фиг. 52. Фиг. 53.



4) При расположеніи катушекъ, указанномъ въ п. 1, два изъ зажимовъ, принадлежащихъ къ цѣпямъ съ токами различныхъ фазъ, можно соединить вмѣстѣ и употребить только одинъ обратный проводъ, такъ что въ линіи будутъ три провода вмѣсто четырехъ. Соединеніе такое показано на фиг. 53.

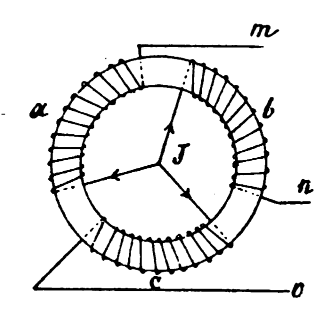
Сложеніе электродвижущихъ силъ.

Необходимо разсмотрѣть, какъ складываются электродвижущія силы, индуктируемыя въ различныхъ катушкахъ; при каждой

изъ указанныхъ комбинацій катушекъ, и какъ это комбинированіе вліяетъ на электродвижущую силу, дѣйствующую въ линейныхъ проводахъ. Пусть измѣненія электродвижущей силы въ катушкѣ a слѣдуетъ закону $v \sin \Theta$, гдѣ v — наибольшая величина, достигаемая электродвижущей въ каждый періодъ (см. стр. 8 и 25).

Двухфазныя системы. Если катушки соединены въ двѣ отдѣльныя группы, какъ на фиг. 49, или соединены звѣздой, какъ на фиг. 50, разность потенціаловъ у зажимовъ m и o будетъ $2 v \sin \Theta$. Въ случаѣ соединенія звѣздой между зажимами m и n будетъ разность потенціаловъ $\sqrt{2} \,.\, v \sin (\Theta + 45)$, то-есть напряженіе между двумя линейными проводами разныхъ фазъ, въ 1,4 раза больше напряженія между зажимами одной обмотки, и по фазѣ упреждаетъ его на 45°.

Фиг. 54.



Когда катушки соединены, четыреугольникомъ, какъ на фиг. 52 напряженіе между m и p будетъ, конечно, равно электродвижущей силѣ, развивающейся въ a, именно равно $V \sin \Theta$, тогда какъ напряженіе между n и p будетъ $\sqrt{2}.\ V \sin (\Theta - 45^0)$, т. е. она будетъ въ 1,4 раза больше напряженія на концахъ одной катушки и фаза его будетъ средняя между фазами электродвижущей силы въ катушкахъ a и b.

Въ случаѣ, когда примѣняется общій обратный проводъ, напряженіе между каждой изъ внѣшнихъ проволокъ и обратнымъ проводомъ будетъ просто вдвое больше напряженія на концахъ каждой катушки, напряженіе же между двумя внѣшними проводами будетъ въ 1,4 раза больше, т. е. будетъ

$$2\sqrt{2} \,.\, v \sin (\Theta + 45^0).$$

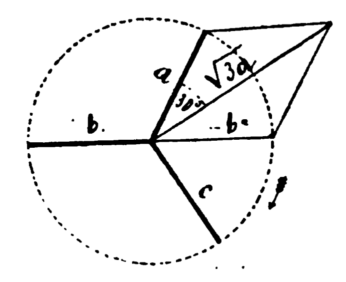
Трехфазныя системы. Чтобы найти, какъ мѣняется напряженіе между линейными проводами трехфазной системы, когда катушки генератора соединены звѣздой, обратимся къ фиг. 54. Катушку a, какъ и раньше примемъ за эталонъ для сравненія. Напряженіе на ея концахъ будетъ $v \sin \Theta$. Будемъ считать электродвижущую

силу, направленную *отъ* общей точки соединенія за положительную. Тогда электродвижущая сила въ *b* будетъ $v \sin(\theta - 120)$.

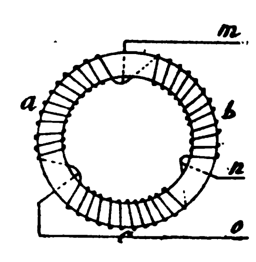
Напряженіе между *m* и *n* равняется разности между электродвижущими силами, развивающимися въ *a* и *b*, т. е. разности

$$v \sin \theta - v \sin(\theta - 120^0) = \sqrt{3}\, v \sin(\theta + 30^0).$$

Фиг. 55.

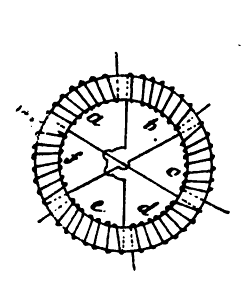


Фиг. 56.

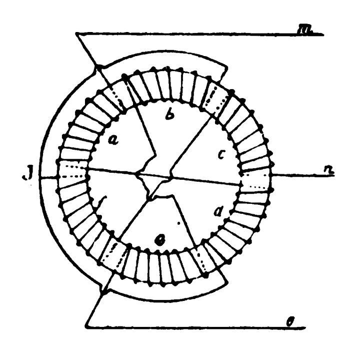


Примѣръ. Если $v = 141$, то число дѣйствующихъ вольтъ, доставляемыхъ катушкой *a*, равняется 100 в. Напряженіе между проводами *m* и *n* равняется $\sqrt{3} \times 100 = 173$ дѣйствующихъ вольтъ. Фаза напряженія на 30° упреждаетъ фазу электродвижущей силы въ катушкѣ *a*. Часовая діаграмма, представленная

Фиг. 57.



Фиг. 58.



на фиг. 55, позволяетъ легче разобраться въ этомъ вопросѣ. Прямыя *a*, *b* и *c* представляютъ электродвижущія силы въ соотвѣтствующихъ катушкахъ. Чтобы вычесть *b*, проведемъ равную

длину въ обратную сторону, обозначенную значкомъ—b и построимъ параллелограммъ. Получимъ равнодѣйствующую электродвижущую силу, упреждающую на 30^0 электродвижущую силу въ a и b и $\sqrt{3}$ разъ большую, чѣмъ эта послѣдняя.

Если катушки трехфазнаго генератора соединены треугольникомъ, какъ показано на фиг. 56, то напряженіе между проводами m и o равняется просто электродвижущей силѣ, образующейся въ катушкѣ a.

Фиг. 59.

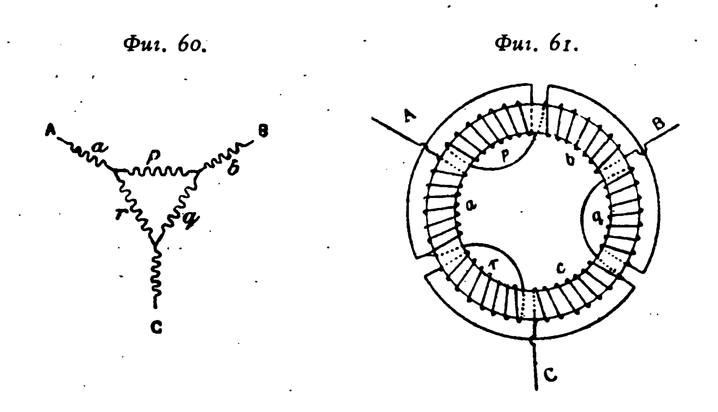
Вообще трехфазные генераторы и двигатели не устраиваются съ такой простой обмоткой изъ трехъ катушекъ, какая изображена на фиг. 54. Обмотка ихъ можетъ состоять изъ шести катушекъ или шести группъ катушекъ, какъ это показано на фиг. 57. Въ этомъ случаѣ катушки соединяются попарно послѣдовательно такимъ образомъ, чтобы каждая пара дѣйствовала, какъ одна катушка съ двойной электродвижущей силой.

Фиг. 57 на самомъ дѣлѣ представляетъ изъ себя только схематическій чертежъ расположенія катушекъ, указаннаго на фиг. 22, только тутъ катушки расположены по всей окружности, вмѣсто того, чтобы занимать, какъ на фиг. 22, только пространство между двумя сосѣдними сѣверными полюсами. Такъ какъ катушки соединены попарно, то мы какъ бы имѣемъ всего три катушки. Взявъ ихъ въ такомъ порядкѣ

$$a + d$$
$$c + f$$
$$e + b$$

мы увидимъ, что они отстоятъ другъ отъ друга на 120^0 и, слѣдовательно, ихъ можно считать совершенно такими же, какъ три катушки на фиг. 54 т. е. мы можемъ соединять ихъ или звѣздой, какъ на фиг. 58, причемъ напряженіе между m и o будетъ

$2\sqrt{3}\, v \sin(\Theta + 30^0)$, или треугольникомъ, какъ на фиг. 59, причемъ напряженіе между k и s будетъ $2\, v \sin \Theta$.



Фиг. 60. *Фиг. 61.*

Комбинація системъ звѣзды и треугольника схематически изображена на фиг. 60. На фиг. 61 показано, какъ могутъ быть соединены шесть катушекъ, намотанныхъ въ одну сторону (слѣва направо) на кольцевомъ сердечникѣ. Въ этомъ случаѣ напряженіе между любыми двумя зажимами, напр., A и B, будетъ измѣняться по закону $2\, v \sin(\Theta - 60^0)$; причемъ $v \sin \Theta$ есть электродвижущая сила въ a.

Подобнаго рода комбинаціи были впервые придуманы Доброволькимъ, съ цѣлью получить въ двигателяхъ болѣе равномѣрную пару силъ, чѣмъ та, которая достигается простымъ соединеніемъ катушекъ, съ трехфазными токами.

Сложеніе токовъ.

Посмотримъ теперь, каковы будутъ относительныя силы токовъ въ различныхъ проводахъ многофазной системы, въ случаяхъ, когда они соединены звѣздой или многоугольникомъ. Существуютъ нѣсколько общихъ законовъ, которые позволяютъ опредѣлять силы токовъ въ любой системѣ проводниковъ.

1. Когда нѣсколько проволокъ сходятся въ одной точкѣ, то алгебраическая сумма мгновенныхъ [1]) силъ токовъ въ нихъ (если

[1]) т. е. силъ токовъ въ нѣкоторый моментъ.

Прим. Пер.



токамъ разныхъ направленій придавать различные знаки, напр., считать за положительные токи, идущіе отъ точки встрѣчи) равна нулю.

2. Въ случаѣ перемѣнныхъ токовъ этотъ законъ можетъ быть примѣняемъ только къ мгновеннымъ силамъ токовъ, а не къ дѣйствующимъ, исключая случая, когда всѣ токи всегда находятся въ одинаковыхъ фазахъ.

3. Когда два тока различныхъ фазъ проходятъ по одному проводнику, получающаяся сила тока можетъ быть опредѣлена графическимъ способомъ, указаннымъ на фиг. 29, гдѣ OP и OQ должны изображать два складываемыхъ тока, а OR—получающійся токъ. Слѣдовательно, можно примѣнять и формулу, выведенную уже разъ изъ этого построенія. Если $a \sin(\Theta + \varphi_{\prime})$ будетъ сила одного тока, а $b \sin(\Theta + \varphi_{\prime\prime})$ сила другаго тока, то сила получающагося отъ ихъ сложенія тока будетъ:

$$\sqrt{a^2 + b^3 + 2\ ab\ \cos(\varphi_{\prime\prime} - \varphi_{\prime})}.\ \mathrm{Sin}\ (\Theta + \varphi_{\prime\prime\prime}),$$

гдѣ уголъ $\varphi_{\prime\prime\prime}$ опредѣляется формулой:

$$\mathrm{tang}\ \varphi_{\prime\prime\prime} = \frac{a \sin \varphi_{\prime} + b \sin \varphi_{\prime\prime}}{a \cos \varphi_{\prime} + b \cos \varphi_{\prime\prime}}$$

4. Слѣдуетъ разъ на всегда точно условиться относительно знаковъ, обозначающихъ направленіе тока. Напримѣръ при разсмотрѣніи проводниковъ въ генераторѣ, соединенныхъ звѣздой, удобно принимать направленіе *отъ* точки соединенія за положительное. Тогда въ линейныхъ проводахъ положительнымъ направленіемъ будетъ направленіе *отъ* генератора къ лампамъ или двигателямъ. При соединеніи многоугольникомъ за положительное направленіе берется направленіе, совпадающее съ направленіемъ движенія часовой стрѣлки.

Примѣняя эти законы для опредѣленія относительныхъ величинъ силъ токовъ и ихъ фазъ въ различныхъ проводникахъ какой-нибудь системы, мы сейчасъ же замѣтимъ, что силы и фазы токовъ будутъ зависѣть отъ кажущихся сопротивленій различныхъ цѣпей. Общіе законы распредѣленія токовъ мы можемъ

вывести только для случая, когда имѣемъ симметричную систему, симметрично нагруженную.

Въ случаѣ двухфазнаго генератора съ катушками, соединенными четырехугольникомъ, двѣ цѣпи котораго нагружены одинаково, сила тока въ линіи m (фиг. 52) будетъ въ каждый моментъ равняться суммѣ силъ токовъ въ катушкахъ a и b. Если сила тока въ катушкѣ a равняется $C \sin \Theta$, а сила тока въ катушкѣ b—равняется $C \sin (\Theta - 90^{\circ})$, причемъ положительное направленіе тока въ катушкѣ b будетъ *отъ* точки ея соединенія съ a то мы, должны написать

$$C \sin \Theta - C \sin (\Theta - 90^{\circ}),$$

откуда для силы тока въ проводѣ m получаемъ выраженіе

$$\sqrt{2}\ C \sin (\Theta + 45^{\circ}).$$

Въ случаяхъ, когда катушки соединены звѣздой или составляютъ отдѣльныя обмотки, силы токовъ въ линейныхъ проводахъ будутъ конечно равны силамъ токовъ въ соотвѣтствующихъ катушкахъ.

Если въ двухфазной системѣ примѣненъ одинъ обратный проводъ, какъ на фиг. 53, то, даже если нагрузки для токовъ каждой фазы будутъ одинаковы, всетаки разность фазъ между двумя токами возрастетъ до величины немного большей 90°, т. е. сила тока, фаза котораго впереди, достигнетъ максимума нѣсколько раньше, чѣмъ если бы токи были независимы, а сила тока, фаза котораго отстаетъ, достигнетъ максимума нѣсколько позже. Однако это отклоненіе разности фазъ отъ 90° можетъ быть сдѣлано сколь угодно малымъ простымъ уменьшеніемъ сопротивленія линіи. Даже въ линіи, въ которой теряется 15% всей энергіи, разность фазъ увеличивается всего на 6° [1]), такъ что практически мы можемъ складывать токи такъ же, какъ въ предыдущемъ случаѣ, когда катушки соединены четырехугольникомъ, и считать, что токъ въ обратномъ проводѣ въ $\sqrt{2}$ или

---

[1]) *Rodet et Busquet.* «Les Courants polyphasés,» p. 19. Русскій переводъ Денисьевскаго.

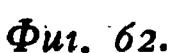
въ 1,4 раза больше, чѣмъ въ другихъ двухъ проводахъ и что фаза его средняя между фазами токовъ въ этихъ послѣднихъ.

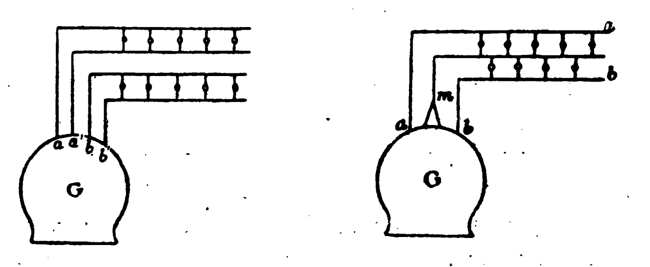
Токи въ катушкахъ трехфазнаго генератора, если они соединены треугольникомъ, можно складывать совершенно такъ же, какъ въ случаѣ двухфазныхъ токовъ.

Фиг. 55 (стр. 51) даетъ намъ

$$\sin \Theta - \sin (\Theta - 120^{\circ}) = \sqrt{3} \sin (\Theta + 30^{\circ}),$$

т. е. что сила тока въ линейномъ проводѣ въ $\sqrt{3}$ или въ 1,73 раза больше силы тока въ катушкахъ. Сравнивая эти результаты, съ результатами, полученными для электродвижущихъ силъ, мы видимъ, что въ случаѣ соединенія звѣздой, напряженіе между


Фиг. 62. *Фиг. 63.*



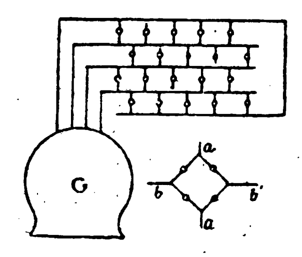
линейными проводами больше, чѣмъ между зажимами катушекъ, сила же тока одна и та же; въ случаѣ же соединенія треугольникомъ, сила тока въ линейныхъ проводахъ больше, чѣмъ въ катушкахъ, напряженіе же между проводами и между зажимами катушекъ одно и то же.

Включеніе лампъ въ многофазныя цѣпи.

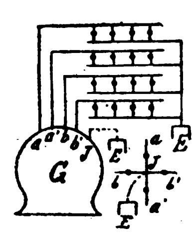
Все раньше изложенное можно иллюстрировать, разсмотрѣвъ разные способы включенія лампъ въ цѣпи, питаемыя многофазными токами.

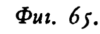
Лампы въ двухфазной цѣпи. Положимъ, что генераторъ *G* (фиг. 62) доставляетъ два тока въ квадратурахъ (т. е. фазы которыхъ разнятся на $^1/_4$ періода). Эти токи могутъ быть примѣнены, какъ показано на фиг. 62, для питанія двухъ независи-

мыхъ цѣпей, въ которыя включаются лампы или двигатели. Въ этомъ случаѣ надо имѣть четыре провода. Но, какъ было уже раньше показано, можно уменьшить число проводовъ до трехъ, сдѣлавъ обратную проволоку *m* (фиг. 63) общей. Чтобы можно было включить въ каждую изъ двухъ цѣпей одинаковое число лампъ, средняя проволока должна быть толще крайнихъ, но не вдвое, какъ это было бы, если бы токи не имѣли разности фазъ а меньше т. к. наибольшая сила тока въ среднемъ проводѣ будетъ лишь въ $\sqrt{2}$ раза больше, чѣмъ во внѣшнихъ. Число вольтъ между проводами *a* и *b* не будетъ вдвое больше, чѣмъ между *a* и *m* или между *b* и *m*, но только будетъ въ $\sqrt{2}$ раза больше послѣдняго. Дѣйствительно, если въ двѣ цѣпи между *a* и *m* и между *b* и *m* включены 70-вольтовыя лампы, то можно еще помѣстить третій рядъ лампъ между *a* и *b*, но уже рядъ лампъ 100-вольтовыхъ.



Фиг. 64.





Фиг. 65.

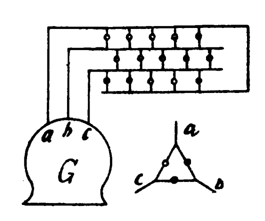
Примѣняя четыре линейныхъ провода, можно еще соединять лампы и четырехугольникомъ, какъ показано на фиг. 64. Въ этомъ случаѣ, если лампы 100-вольтныя, то напряженіе между *a* и *a'* также какъ и между *b* и *b'* будетъ 141,4 вольтъ. При одинаковомъ числѣ лампъ во всѣхъ цѣпяхъ, сила тока въ каждомъ линейномъ проводѣ будетъ въ 1,41 раза больше, чѣмъ та, которая требуется для питанія одного ряда лампъ.

Если лампы включены въ систему проводовъ, соединенныхъ звѣздой, какъ это показано на фиг. 65, то есть нѣкоторая выгода соединить общую точку соединенія *J* съ землей (т. е. съ общей обратной проволокой, которую не надо изолировать), если

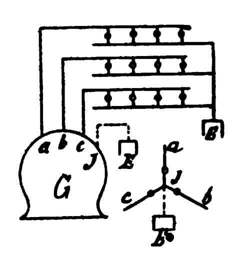
только катушки генератора тоже соединены звѣздой, такъ что ихъ общую точку можно тоже соединить съ землей. Если лампы 100-вольтовыя, то между *a* и *a'* и *b* и *b'* должно бы было быть 200 вольтъ, а будетъ 141,4 вольтъ.

Лампы въ трехфазной цѣпи. Трехфазныя цѣпи, подобныя двумъ только что описаннымъ, представлены на фиг. 66 и фиг. 67. На фиг. 66 представлено соединеніе треугольникомъ. При ровномъ числѣ лампъ во всѣхъ трехъ рядахъ, сила тока въ каждомъ изъ трехъ линейныхъ проводовъ будетъ въ 1,73 раза больше той силы, которая нужна для питанія одного ряда лампъ.

Фиг. 66.



Фиг. 67.



Если лампы соединены звѣздой (фиг. 67), средняя точка можетъ быть соединена съ землей, если только соотвѣтствующая точка генератора (или трансформатора) тоже соединена съ землей. Это было сдѣлано при передачѣ трехфазными токами энергіи изъ Лауффена во Франкфуртъ 1891 г. и такое соединеніе примѣнено теперь при трехфазномъ распредѣленіи энергіи въ Гейльборнѣ (гл. XV). Если употребляются лампы 100-вольтовыя, то напряженіе между любыми изъ трехъ проводовъ будетъ 173 вольта.

Ни при соединеніи лампъ звѣздой, ни при соединеніи ихъ треугольникомъ не будетъ существовать абсолютной независимости параллельно соединенныхъ лампъ, хотя при соединеніи звѣздой мы приближаемся къ ней ближе. Если включить или выключить лампы въ любомъ изъ рядовъ, то напряженіе въ другихъ рядахъ всегда болѣе или менѣе измѣнится. Однако примѣненіе общаго обратнаго провода отъ центра звѣзды значительно уменьшаетъ это измѣненіе.

Въ качествѣ курьеза можно упомянуть объ лампахъ накали-

ванія съ тремя углями, соединенными въ одной точкѣ и съ тремя внѣшними зажимами, предназначаемыми для трехфазныхъ токовъ. Такія лампы были впервые устроены въ 1891 г. Доброволъскимъ. Затѣмъ лампы съ тремя спиралями были устроены компаніей Эдисонъ-Сванъ для автора этой книги, для его лекцій въ Королевскомъ институтѣ въ февралѣ 1894 г. На той же лекціи была показана трехфазная дуговая лампа, съ тремя углями, сходящи-ся подъ угломъ въ 120°. Дуга въ этой лампѣ имѣла вращательное движеніе.

Экономія мѣди.

Существуетъ мнѣніе, что при примѣненіи многофазныхъ токовъ для того, чтобы передать опредѣленное количество энергіи на опредѣленное разстояніе, можно затратить на проводники меньшее количество мѣди, чѣмъ то, которое требуется для той же цѣли при примѣненіи однофазныхъ токовъ. Вообще въ правильности этого мнѣнія не можетъ быть никакого сомнѣнія, споры же, которые были имъ вызваны, произошли оттого, что спорившія стороны брали для сравненія различные критеріи. Экономія въ мѣди—отъ которой зависитъ главнымъ образомъ стоимость передачъ на дальнія разстоянія—зависитъ, какъ это хорошо извѣстно каждому электротехнику, отъ напряженія тока, который служитъ для передачи энергіи. Такъ что, если желаемъ сравнить между собой различныя системы, то необходимо всегда принимать одно и то же напряженіе токовъ во всѣхъ системахъ. Но тутъ является вопросъ, между какими точками цѣпи надо измѣрять напряженіе, которое приходится принимать во вниманіе.

Надо помнить при этомъ, что хотя отъ повышенія напряженія зависитъ экономія въ мѣди, однако нельзя это напряженіе въ распредѣлительной или передаточной цѣпи увеличивать до безконечности. Предѣльное напряженіе опредѣляется въ различныхъ случаяхъ различными соображеніями. Въ системахъ распредѣленія токами низкаго напряженія, предѣльное напряженіе опредѣляется лампами накаливанія, и т. к. онѣ рѣдко устраиваются для напряженій высшихъ 100—110 вольтъ, то и предѣльное напряженіе тока не должно превосходить этихъ чиселъ. Съ другой стороны, когда

энергія распредѣляется только между двигателями, и въ цѣпи нѣтъ лампъ, или когда можно примѣнять трансформаторы, предѣльное напряженіе опредѣляется соображеніями совершенно иного рода, именно соображеніями касающимися изоляціи, которая должна быть примѣнена для безопасности установки. Поэтому, чтобы отвѣтить на поставленный вопросъ, мы должны изучить отдѣльно систему распредѣленія токами низкаго напряженія и отдѣльно систему распредѣленія токами высокаго напряженія и разсмотрѣть ихъ достоинства.

1. *Системы токовъ высокаго напряженія.* При примѣненіи токовъ высокаго напряженія труднѣе всего найти изоляцію, которая выдерживала бы большія разности потенціаловъ. Это на практикѣ и ограничиваетъ предѣльное напряженіе. Поэтому, если мы желаемъ сравнить систему многофазную съ однофазной, мы должны разсматривать только случаи совершенно одинаковые съ точки зрѣнія изоляціи. Въ случаѣ однофазнаго тока (а также постояннаго) часто потенціалъ одного проводника дѣлаютъ равнымъ потенціалу земли, и второй проводникъ изолируютъ, сообразно напряженію между двумя проводами. Въ этомъ случаѣ ясно, что максимумъ напряженія между двумя проводами и будетъ то, что мы называемъ *напряженіемъ системы.* Но если оба провода изолированы отъ земли, такъ что ихъ изоляція можетъ безопасно вынести наибольшее напряженіе между соотвѣтствующимъ проводомъ и землей, тогда разность потенціаловъ между проводами можетъ безопасно сдѣлаться вдвое большимъ, чѣмъ наибольшее напряженіе между проводами и землей, и изоляціи не будетъ нарушена, если только провода настолько хорошо изолированы другъ отъ друга, что опасности отъ нарушенія изоляцій между ними нѣтъ. Тутъ и является вопросъ, какое напряженіе мы должны брать за основаніе при сравненіи различныхъ системъ: напряженіе ли между проводами или напряженіе между каждымъ проводомъ и землей. Если мы за основаніе возьмемъ наибольшее напряженіе между любой точкой линіи и землей, то не найдемъ никакого преимущества въ смыслѣ экономіи мѣди у многофазныхъ токовъ, т. к. каждый проводъ *всякой* системы, по которому проходитъ токъ опредѣленной силы и наибольшаго допустимаго напряженія (относи-

тельно земли), можно разсматривать, какъ передающій опредѣленное количество энергіи. При этомъ количество передаваемой энергіи будетъ просто пропорціонально числу линейныхъ проводовъ, а этому числу пропорціонально количество затраченной на передачу мѣди.

Напримѣръ, трехфазная система, въ которой соединеніе сдѣлано звѣздой, общая точка соединена съ землей и напряженіе между каждымъ проводомъ и землей равняется 1000 вольтамъ (слѣд. между проводами 1732 в.), что касается изоляціи, не имѣетъ никакихъ преимуществъ передъ однофазной системой, у которой тоже напряженіе между проводами и землей равно 1000 в. (слѣд. между проводами 2000 в.). Чтобы передать одно и тоже количество энергіи съ одинаковой потерей въ линіи, надо, чтобы каждый изъ двухъ проводовъ однофазной системы былъ въ $1\frac{1}{2}$ раза тяжелѣе каждаго изъ трехъ проводовъ трехфазной системы. Слѣдовательно, при обѣихъ системахъ потребуется одно и то же количество мѣди.

Если же мы примемъ за основаніе для сравненія наибольшее напряженіе между двумя проводами, то мы должны уже будемъ принимать во вниманіе опасность порчи изоляціи не въ линіи, но въ машинахъ, трансформаторахъ и т. п., въ которыхъ изоляція должна считаться всегда одинаково хорошей. При такомъ основаніи для сравненія, при примѣненіи трехфазныхъ токовъ, получается значительная экономія въ мѣди, въ чемъ можно убѣдиться при помощи слѣдующихъ соображеній.

Возьмемъ сначала установку, въ которой соединенія сдѣланы треугольникомъ (фиг. 56, стр. 51). Если распредѣленіе тока симметрично, то сила тока въ a, одной изъ сторонъ треугольника (фиг. 160), будетъ равняться $\frac{1}{\sqrt{3}}$ части силы тока p въ линіи (см. стр. 56).

Поэтому количество энергіи, получаемое въ одной сторонѣ треугольника, будетъ $\frac{1}{\sqrt{3}}\ p\,.\,V$, гдѣ V — напряженіе между линіями (p и V измѣряются въ дѣйствующихъ амперахъ и въ дѣйствующихъ вольтахъ). Поэтому все количество энергіи будетъ $\sqrt{3}\ p\ V$. Если взять соединеніе звѣздой, то разность потенціаловъ

между концами вѣтвей звѣзды будетъ равняться $\frac{1}{\sqrt{3}}$ V, сила же тока въ каждой вѣтви будетъ та же, что и въ линіи. Поэтому все количество энергіи, какъ и въ первомъ случаѣ, будетъ $\sqrt{3}\ p\ V$. Пусть сопротивленіе каждаго линейнаго проводника будетъ r, тогда потеря энергіи во всѣхъ трехъ проводникахъ $3\ p^2\ r$.

Примѣнимъ теперь для передачи того же количества энергіи $\sqrt{3}\ p\ V$ однофазную систему. Пусть x будетъ сопротивленіе одного линейнаго провода, подобранное такъ, чтобы вся потеря энергіи по прежнему равнялась бы $3\ p^2 r$. Общее сопротивленіе обоихъ проводниковъ будетъ $2\ x$. Сила тока будетъ $\sqrt{3}\ .\ p$ и и потеря $6p^2x$. Если потери равны, то $6p^2x = 3p^2r$, откуда $x = \frac{1}{2} r$, т. е. сопротивленіе каждаго изъ линейныхъ проводовъ при однофазной системѣ должно быть въ два раза меньше, чѣмъ сопротивленіе каждаго изъ проводниковъ при трехфазной. Говоря иными словами, при однофазной системѣ требуется два проводника двойного (сравнительно съ проводниками трехфазной системы) сѣченія, вмѣсто трехъ проводниковъ, требуемыхъ при трехфазной системѣ. Слѣдовательно, при трехфазной системѣ количество затраченной мѣди будетъ равняться только $^3/_4$ того количества, которое требуется при однофазной системѣ.

Двухфазная система съ четырьмя проводниками, въ отношеніи количества затрачиваемой мѣди, ничѣмъ не отличается отъ однофазной.

Если въ двухфазной системѣ пользуются только тремя проводами, изъ которыхъ одинъ служитъ обратнымъ проводомъ, то напряженіе между двумя остальными проводами проводамъ будетъ почти въ $\sqrt{2}$ раза больше, чѣмъ напряженіе между каждымъ изъ нихъ и обратнымъ. Поэтому напряженіе системы мы должны считать равными $\sqrt{2}\ .\ V$. Въ этомъ случаѣ потребуется больше мѣди, чѣмъ если бы то же количество энергіи передано было однофазнымъ токомъ напряженія $\sqrt{2}\ .\ V$.

2. *Системы токовъ низкаго напряженія.* Въ этихъ случаяхъ напряженіе ограничивается предѣломъ, допускаемымъ лампами накаливанія. Мы желаемъ достичь наибольшаго возможнаго напряженія между проводами, служащими для передачи, но въ

то же время имѣть у зажимовъ лампъ требуемую разность потенціаловъ. Оставивъ въ сторонѣ такъ называемыя трехпроводную и пятипроводную системы распредѣленія, и сравнивая только трехфазную, въ которой имѣется три провода, съ однофазной, въ которой два провода, мы можемъ убѣдиться на основаніи соображеній, приведенныхъ на стр. 50, что, если лампы соединены треугольникомъ, трехфазная система имѣетъ преимущество передъ однофазной, т. к. при ея примѣненіи приходится затрачивать 75% мѣди, требуемой при примѣненіи однофазной системы. Если лампы соединены звѣздой, то напряженіе между линейными проводами въ $\sqrt{3}$ разъ больше напряженія у зажимовъ лампъ, откуда слѣдуетъ, что количество мѣди, которое придется затратить, равняется только 1/4 того, которое пришлось бы затратить при примѣненіи однофазной системы съ двумя проводами. Однако такую систему нельзя регулировать, если нѣтъ общаго обратнаго провода и слѣдовательно ее надо скорѣе сравнивать съ трехпроводной однофазной системой, чѣмъ съ двухпроводной.

Гоергесъ въ сообщеніи сдѣланномъ въ засѣданіи Electrotechnisches Verein, напечатанномъ въ *Elektrotechnische Zeitschrift* (17 Jan. 1885) даетъ слѣдующія цифры для вѣса проводниковъ при передачѣ одного и того же количества энергіи при помощи различныхъ системъ, причемъ напряженіе и паденіе напряженія будетъ одно и то же:

При однофазной	сист.	2	провода		100
»	»	3	»	(причемъ 3-й пров. предполагается половиннаго сѣченія)	31,35
» двухфазной	»	4	»		100
»	»	3	»	(принимая въ разсчетъ напряженіе между линіей и общей возвр. проволокой).	72,8
» трехфазной	»	3	»	(треугольникъ).	75,0
»	»	4	»	(четвертый отъ общей точки соединенія)	29,2

Другой путь разсмотрѣнія занимающаго насъ вопроса состоитъ въ томъ, что надо опредѣлить, каково должно быть напряженіе тока въ проводахъ разныхъ системъ, чтобы передать

по проводамъ одного и того же вѣса, съ одинаковой потерей, одно и то же количество энергіи. Если при примѣненіи трехфазной системы съ соединеніемъ звѣздой и съ четвертымъ проводникомъ, напряженіе между тремя проводами и четвертымъ, нейтральнымъ, должно равняться 1000 вольтамъ, то напряженіе между проводами однофазной системы (при высказанномъ выше условіи) должно равнятся 1850.

При этомъ предполагается, что система уравновѣшена такъ, что въ четвертомъ проводникѣ нѣтъ тока.

Наибольшее напряженіе между проводами при трехфазной системѣ будетъ лишь 1732 вольта. Если въ трехфазной системѣ не примѣненъ четвертый проводникъ (что можно сдѣлать, когда токъ питаетъ только двигатели или трансформаторы), то чтобы однофазная система была столь же экономична, напряженіе тока въ ней должно быть въ 2000 вольтъ.

Сложеніе магнитныхъ полей.

Такъ какъ главная цѣль примѣненій многофазныхъ токовъ есть полученіе вращающихся магнитныхъ полей при помощи комбинаціи перемѣнныхъ полей разныхъ фазъ, то намъ слѣдуетъ теперь заняться вопросомъ, какъ могутъ быть комбинируемы токи различныхъ фазъ съ цѣлью полученія магнитныхъ полей.

Мы можемъ принять, что, если простой перемѣнный токъ проходитъ по обмоткѣ катушки, то намагниченіе ея сердечника будетъ тоже перемѣнное. Если сердечника нѣтъ, а его замѣняетъ просто воздухъ, то получается перемѣнное магнитное поле, если же сердечникъ желѣзный, то потокъ магнитныхъ линій сквозь него—будетъ потокомъ перемѣннымъ, т. е. онъ, образуясь, будетъ сначала увеличиваться до максимума, затѣмъ уменьшаться до нуля, затѣмъ, измѣнивъ направленіе, вновь увеличиваться до обратнаго максимума и уменьшаться до нуля съ тѣмъ, чтобы опять начать тотъ же циклъ измѣненій. Частота такого перемѣннаго потока будетъ та же, что и частота создающей его магнитодвижущей силы, т. е. та же, что и частота тока. Если сердечникъ составленъ изъ хорошо раздѣленнаго желѣза и если нѣтъ вторичныхъ цѣпей, вліяющихъ на взаимодѣйствіе, то магнитный потокъ

практически будетъ совпадать по фазѣ съ токомъ, проходящимъ по обмоткѣ катушки. Всякіе паразитные токи и всякіе токи, возбуждаемые сердечникомъ въ сосѣднихъ проводникахъ, необходимо замедлятъ образованіе перемѣннаго магнитнаго потока и заставятъ его отстать по фазѣ отъ тока. Подобное вліяніе токовъ, индуктируемыхъ въ замкнутыхъ вторичныхъ цѣпяхъ, какъ мы увидимъ, играетъ весьма большую роль въ современныхъ многофазныхъ двигателяхъ.

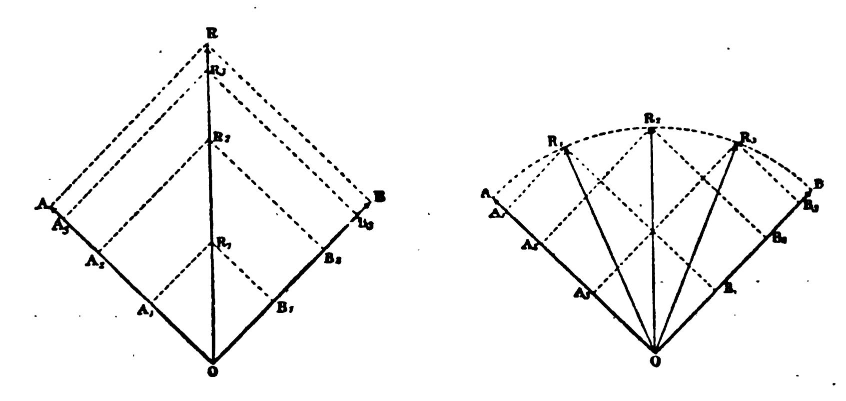
Само собой ясно, что (въ случаѣ отсутствія вторичныхъ вліяній) перемѣнная намагничивающая сила, дѣйствующая по нѣкоторому опредѣленному направленію произведетъ перемѣнный магнитный потокъ, тогда какъ намагничивающая сила, постоянная по величинѣ, но непрерывно измѣняющая свое направленіе—вращающаяся въ пространствѣ—будетъ стремиться произвести вращающійся магнитный потокъ. Будетъ ли получающійся магнитный потокъ имѣть постоянную величину или равномѣрную скорость вращенія, или нѣтъ — это будетъ зависѣть не только отъ равномѣрности, вращенія вращающейся намагничивающей силы, и отъ отсутствія вторичныхъ токовъ, но и отъ формы магнитныхъ массъ, а также и отъ того, будутъ ли онѣ расположены симметрично (въ магнитномъ отношеніи), относительно оси вращенія намагничивающихъ силъ.

Чтобы легче схватить сущность вопроса, мы начнемъ съ того что разсмотримъ задачу о сложеніи намагничивающихъ силъ съ цѣлью опредѣленія получающейся при этомъ равнодѣйствующей намагничивающей силы.

Если изображать величины и направленія магнитныхъ полей длиной и направленіемъ нѣкоторыхъ прямыхъ, то для ихъ сложенія мы можемъ примѣнить обыкновенное правило параллелограмма, служащее для сложенія векторовъ, и опредѣлить получающееся магнитное поле, отличающееся по величинѣ и направленію отъ полей его образующихъ, складывая векторы, изображающіе эти послѣднія, т. е. строя діагональ параллелограмма силъ. Въ случаѣ, если величины слагающихъ мѣняются, правильно періодически, надо принимать еще во вниманіе, имѣютъ ли они одинаковый періодъ измѣненія и есть ли между ихъ измѣненіями разность фазъ. Возьмемъ, напримѣръ, случай, когда два

слагающихъ вектора A и B имѣютъ постоянное направленіе, но величина ихъ мѣняется. Сначала разсмотримъ случай, когда они мѣняются одновременно безъ всякой разности фазъ (фиг. 68). Когда слагающая A имѣетъ малую величину OA_1 и слагающая B— малую величину OB_1, равнодѣйствующая будетъ OR_1. Когда A увеличивается до OA_2 и B до OB_2, равнодѣйствующая будетъ OR_2 и т. д. Очевидно, что, если слагающія A и B будутъ увеличиваться и уменьшаться одновременно, равнодѣйствующая тоже

Фиг. 68. *Фиг. 69.*



будетъ измѣняться такимъ же образомъ, не отличаясь по фазѣ, и будетъ сохранятъ постоянное направленіе. Короче два перемѣнныхъ вектора одинаковаго періода, находящіеся вдобавокъ всегда въ одинаковыхъ фазахъ, дадутъ въ качествѣ равнодѣйствующей третій перемѣнный векторъ того же періода, той же фазы, и имѣющій вдобавокъ постоянное направленіе.

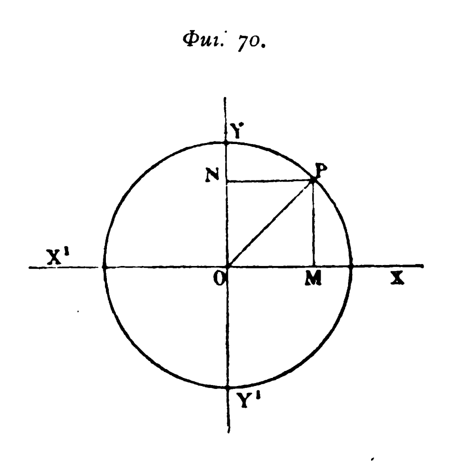
Если теперь фазы измѣненій двухъ слагающихъ не будутъ совпадать, т. е. не будутъ одновременно уменьшаться и увеличиваться (фиг. 69), то ихъ равнодѣйствующая уже не будетъ сохранять постоянное направленіе. Пусть измѣненія A и B будутъ таковы, что когда OA велико — OB будетъ мало, и когда OA уменьшается — OB увеличивается. Тогда, очевидно, равнодѣйствующая будетъ въ разные моменты равняться OR_1, OR_2, OR_3 и т. д. и, *если измѣненія двухъ слагающихъ происходитъ по надлежащему закону*, то равнодѣйствующая можетъ непрерывно измѣ-

нять свое положеніе, не мѣняя величины, т. е., другими словами, можно подобрать два такіе слагающіе вектора, что ихъ равнодѣйствующая будетъ вращающійся векторъ постоянной величины. Каковъ долженъ быть законъ измѣненій векторовъ, дающихъ такую равнодѣйствующую, мы и должны теперь посмотрѣть.

Въ 1883 г. [1]) Марсель Депре сообщилъ Парижской Академіи Наукъ весьма важную теорему относительно полученія настоящаго вращающагося магнитнаго поля при помощи комбинаціи двухъ перемѣнныхъ магнитныхъ полей, отличающихся по фазѣ на четверть періода.

Извѣстно, что равномѣрное круговое движеніе можно разложить на два прямолинейныхъ гармоническихъ движенія, происходящихъ подъ прямымъ угломъ одно относительно другаго, имѣющихъ одинаковыя амплитуды и одинаковые періоды, но отличающіеся по фазѣ на $^1/_4$ періода. Пусть P будетъ точка, равномѣрно вращающаяся вокругъ центра O (фиг. 70).

Фиг. 70.



Проэкція радіуса OP на оси координатъ OX и OY будутъ OM и ON. Если назвать радіусъ OP черезъ r, то мы будемъ имѣть

$$OM = r \text{ Cos } \theta = r \text{ Sin } (\theta + 90^0)$$

и

$$ON = r \text{ Sin } \theta.$$

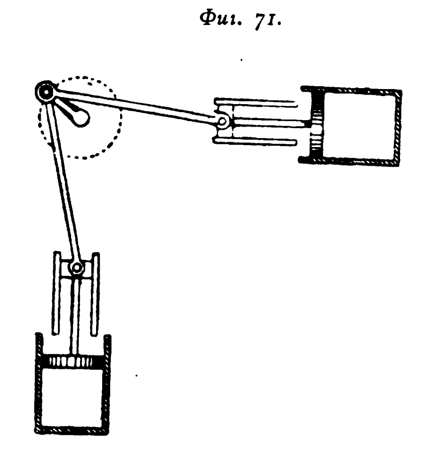
При вращеніи точки P, точка N будетъ колебаться вверхъ и внизъ по прямой YY', причемъ амплитуда этого колебанія будетъ равна радіусу круга. Точно также точка M будетъ колебаться по линіи XX' съ той амплитудой и съ тѣмъ же періодомъ колебанія, но величина OM будетъ наибольшей когда величина ON наименьшая и наоборотъ. Отсюда кинематически

[1]) Comptes Rendus, 1893, II, p. 1193.

слѣдуетъ, что равномѣрное круговое движеніе можетъ быть получено изъ двухъ прямолинейныхъ движеній, происходящихъ подъ прямымъ угломъ другъ относительно друга, если эти движенія гармоническія, равнаго періода, равной амплитуды и разнятся по фазѣ ровно на четверть періода.

Механически подобное сложеніе можетъ быть выполнено при помощи двухъ поршней, помѣщенныхъ подъ прямымъ угломъ, имѣющихъ одинаковый ходъ и дѣйствующихъ при посредствѣ двухъ соединительныхъ штангъ на одинъ и тотъ же стержень мотыля (фиг. 71). Если валу этого мотыля сообщить вращательное движеніе, то оно будетъ разложено на два прямолинейныхъ. Приборъ въ этомъ случаѣ будетъ дѣйствовать какъ двойной насосъ. Если, наоборотъ, заставить поршни производить два прямолинейныхъ движенія, отличающихся по времени другъ отъ друга на 1/4 періода, то приборъ будетъ преобразовывать эти движенія въ одно круговое и станетъ эквивалентнымъ машинѣ съ двумя кривошипами и двумя параллельными цилиндрами.

Фиг. 71.



Депре показалъ, что можетъ быть устроена и магнитная комбинація подобнаго же рода. Если пропустить перемѣнный токъ черезъ катушку, помѣщенную такимъ образомъ, чтобы она произвела перемѣнное или колебательное магнитное поле, направленное по OX и другой перемѣнный токъ черезъ вторую катушку, помѣщенную такъ, чтобы она создала перемѣнное поле, направленное по OY, то отъ комбинаціи такихъ полей получается *вращающееся* магнитное поле, если только оба образующія магнитныя поля будутъ одной амплитуды, одного періода и будутъ толичаться другъ отъ друга по фазѣ ровно на четверть періода.

Если они будутъ одного періода, но не совершенно равныхъ амплитудъ, то отъ ихъ комбинаціи получится, такъ сказать, *элиптически*-вращающееся магнитное поле, т. е. поле, направленіе и напряженіе котораго будутъ изображаться радіусомъ вектором элипса, проведеннымъ изъ его центра и проходящаго въ равные промежутки времени равныя площади. Точно также эллиптически-вращающееся мигнитное поле получится, если оба слагающія поля будутъ имѣть равные періоды и амплитуды, но будутъ разниться по фазѣ не ровно на четверть періода. Для полученія совершеннаго вращающагося поля необходимо, чтобы слагающія измѣнялись одна пропорціонально синусу и другая косинусу нѣкотора угла[1]).

Описанная комбинація далеко не единственная, которая можетъ произвести вращающееся магнитное поле. Механизмы въ родѣ трехцилиндровой машины или тройнаго насоса наводятъ на мысль объ иныхъ способахъ его полученія. Въ первомъ случаѣ (т. е. въ машинѣ) устроиваютъ три цилиндра съ тремя поршнями, работающими съ разностью фазъ въ одну треть періода одинъ относительно другаго. Если цилиндры расположены (какъ въ машинѣ Бротергуда) подъ угломъ въ 120° другъ къ другу, то ихъ поршневые штоки могутъ дѣйствовать на одинъ общій кривошипъ. Если же всѣ три цилиндра помѣщены рядомъ, параллельно другъ другу, то тогда должно быть три кривошипа, расположенными подъ углами въ 120°. Если бы угловое разстояніе между кривошипами не было бы ровно 120°, то разность фазъ движеній не была бы равна въ одну треть періода. Разность фазъ движеній должна соотвѣтствовать угловымъ размѣрамъ механизма, комбинирующаго ихъ. Въ кинематикѣ существуетъ основное положеніе, что при комбинаціи гармоническихъ движеній съ цѣлью полученія вращенія, пространственная фаза угла комбинирующаго механизма, должна быть дополненіемъ угла, представляющаго временную фазу движенія. Иначе получающееся движеніе не будетъ *равномѣрнымъ* вращеніемъ.

Знаменитая трехфазная система токовъ (или *drehstrom*), слу-

---

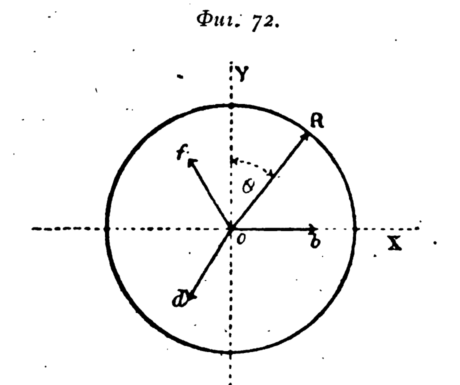
[1]) См. *Ferraris* «Rotazioni electrodynamiche» Turin. Acad. March. 1888.



жащая для полученія вращающагося магнитнаго поля есть электрическая аналогія трехмотыльнаго механизма.

Занимаясь подобными комбинаціями магнитныхъ полей, мы можемъ идти и аналитическимъ путемъ. Мы имѣемъ три катушки или три пары катушекъ, производящихъ каждая слагающее магнитное поле, измѣняющееся въ опредѣленномъ направленіи, и мы хотимъ опредѣлить, каково будетъ поле, образующееся вслѣдствіе комбинаціи этихъ полей. Если катушки помѣщены подъ угломъ одна относительно другой, то намъ приходится принимать во вниманіе не только напряженіе каждаго поля, зависящаго отъ фазы соотвѣтствующаго тока, но и его направленіе. Это проще всего сдѣлать, разлагая поле, производимое каждой цѣпью, на два слагающихъ по направленію осей X и Y. Разсмотримъ, напримѣръ, дѣйствіе катушекъ, намотанныхъ на кольцевомъ сердечникѣ (фиг. 58). Катушки b и e произведутъ вмѣстѣ горизонтальный потокъ, направленный по Ob, вдоль по оси X)фиг. 72). Величина этого потока будетъ измѣняться по закону H Sin θ. Катушки d и a создадутъ поле, направленное по Od, напряженіе котораго будетъ мѣняться по закону H Sin (θ—120°). Совершенно также катушки f и c произведутъ потокъ, направленный по Of и слѣдующій закону H Sin (θ—240°).

Фиг. 72.



Проэктируя эти величины на ось X и складывая проэкціи, получимъ:

$$H \operatorname{Sin} \theta - H \operatorname{Sin} (\theta - 120^\circ) \operatorname{Cos} 60^\circ - H \operatorname{Sin} (\theta - 240^\circ) \operatorname{Cos} 60^\circ = {}^3/_2\, H \operatorname{Sin} \theta.$$

Дѣлая то же самое для оси Y, найдемъ:

$$H \operatorname{Sin} (\theta - 240^\circ) \operatorname{Cos} 30^\circ - H \operatorname{Sin} (\theta - 120^\circ) \operatorname{Cos} 30^\circ = {}^3/_2\, H \operatorname{Cos} \theta$$

Если мы теперь начертимъ линію OR, изображающую въ принятомъ масштабѣ $^3/_2\, H$ и составляющую уголъ θ съ осью Y, то мы увидимъ, что когда θ увеличивается и OR вращается вокругъ

точки O, проэкція OR на оси X и Y будутъ соотвѣтственно $^3/_2\ H\ \mathrm{Sin}\ \Theta$ и $^3/_2\ H\ \mathrm{Cos}\ \Theta$. Слѣдовательно прямая OR въ каждый моментъ даетъ направленіе поля, образующагося отъ сложенія трехъ полей. Напряженіе такого поля будетъ величина постоянная, равная полуторному напряженію каждаго изъ составляющихъ, и оно будетъ вращаться съ постоянной угловой скоростью.

Вообще мы можемъ сказать, что отношеніе напряженія поля, получающагося отъ комбинаціи m симметрично расположенныхъ разнофазныхъ полей, къ напряженію каждаго изъ составляющихъ полей будетъ $\frac{m}{2}$.

Мы знаемъ теперь, какъ должны быть расположены въ пространствѣ поля, когда мы имѣемъ дѣло съ простыми двухфазными и трехфазными токами: чтобы получить равномѣрно вращающееся магнитное поле, мы должны имѣть въ качествѣ составляющихъ или два одинаковыхъ поля, отличающихся по фазѣ на четверть періода и расположенныхъ подъ угломъ въ 90° (т. е. въ $^1/_4$ окружности) другъ къ другу, или три одинаковыхъ поля, отличающихся другъ отъ друга по фазѣ на одну треть періода и расположенныхъ другъ относительно друга подъ угломъ въ 120° (т. е. въ одну треть окружности). Очевидно могутъ встрѣтиться и другіе случаи. Напримѣръ, разсматривая механизмъ, изображенный на фиг. 71, можно видѣть, что простымъ помѣщеніемъ цилиндровъ подъ угломъ отличнымъ отъ 90° равномѣрное вращательное движеніе можетъ быть разложено на два гармоническіе равные періода, отличающіеся по фазѣ уже не на четверть періода. На стр. 64 было уже сказано, что равномѣрное вращательное движеніе можетъ быть получено сложеніемъ двухъ равныхъ простыхъ гармоническихъ движеній, отличающихся по фазѣ не на $^1/_4$ періода, если только ихъ направленія таковы, что уголъ пространственной фазы служитъ дополненіемъ угла временной фазы ихъ движенія.

Теперь мы скажемъ только нѣсколько словъ относительно случаевъ, когда временная фаза слагающихъ не соотвѣтствуетъ пространственной фазѣ ихъ относительнаго положенія. Въ этихъ случаяхъ результатомъ сложенія уже не будетъ равномѣрное

вращательное движеніе, но оно будетъ эллиптическое. Равнодѣйствующая будетъ тоже вращаться, но угловая скорость вращенія и величина этой равнодѣйствующей не будутъ постоянны. Всѣ случаи эллиптическаго вращенія равнодѣйствующей можно разбить на нѣсколько классовъ.

Если оба слагающія простыя гармоническія движенія равны по амплитудѣ и періоду, но относительныя ихъ положенія не таковы, чтобы уголъ, составляемый ихъ направленіями въ пространствѣ, служилъ дополненіемъ разности фазъ по времени, то получающееся движеніе будетъ не круговое, но эллиптическое.

Если оба слагающія движенія имѣютъ равные періоды и ихъ угловыя положенія соотвѣтствуютъ дополнительному углу для разности фазъ, но ихъ амплитуды не равны, то въ результатѣ получится эллиптическое движеніе, причемъ большая ось эллипса будетъ совпадать съ направленіемъ слагающаго движенія, имѣющаго бóльшую амплитуду.

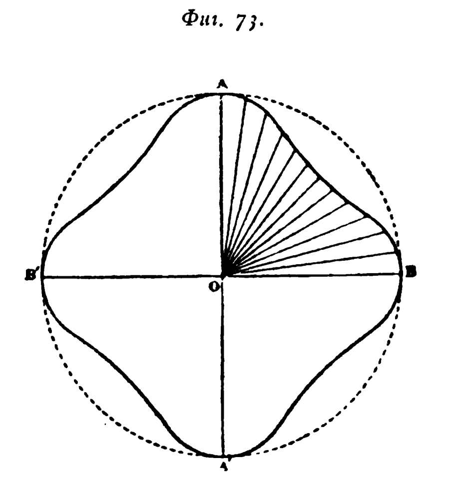
Если углы положенія и фазъ не удовлетворяютъ вышевысказаннымъ условіямъ и амплитуды двухъ слагающихъ движеній не равны, то всетаки получающееся движеніе будетъ эллиптическимъ, если только періоды слагающихъ гармоническихъ движеній равны.

Такимъ же образомъ движеніе, получающееся отъ сложенія трехъ или больше простыхъ гармоническихъ движеній равныхъ періодовъ, будетъ эллиптическое вращеніе, каковы бы не были ихъ амплитуды и каковы бы не были соотношенія между углами ихъ положенія съ угломъ ихъ временныхъ фазъ. (Въ этотъ общій случай входятъ и два частныхъ, именно случай простого гармоническаго движенія, когда фазы всѣхъ слагающихъ одинаковы, и случай равномѣрнаго кругового движенія, когда амплитуды слагающихъ равны и разность временныхъ фазъ соотвѣтствуетъ ихъ угловому положенію). Вотъ почему несимметричныя многофазныя системы, какъ, напримѣръ, такъ называемая, «моноциклическая» (представляющая изъ себя испорченную трехфазную), будутъ почти такъ же пригодны для приведенія въ движеніе двигателей, какъ и симметричныя.

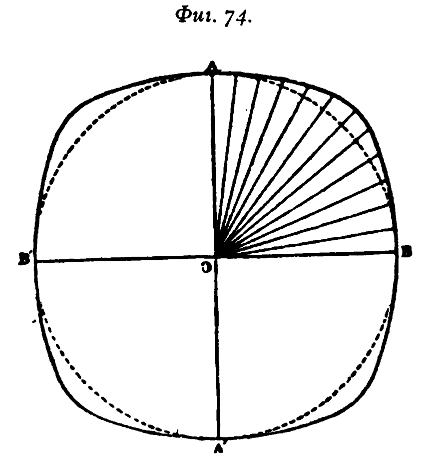
Возвращаясь опять къ настоящимъ двухфазнымъ и трехфазнымъ комбинаціямъ, мы должны замѣтить, что даже въ случаѣ,

когда амплитуды слагающихъ равны и фазы подобраны соотвѣтствующимъ образомъ, въ результатѣ получится равномѣрное круговое движеніе только тогда, когда каждая составляющая измѣняется гармонически, т. е. слѣдуетъ вполнѣ строго закону синусовъ. Но мы знаемъ, что кривыя электродвижущей силы, тока и магнитодвижущихъ силъ во многихъ примѣняемыхъ въ настоящее время системахъ перемѣннаго тока, значительно отличаются отъ простой синусоиды [1]). Можно легко видѣть, какія вообще будутъ слѣдствія всякаго отклоненія кривыхъ отъ синусоидальной формы. Если взять двухфазную комбинацію, то, въ случаѣ, когда слагающія кривыя будутъ типа съ острыми вершинами, получится въ результатѣ кривая вида фиг. 73, въ случаѣ же, когда слагающія кривыя будутъ типа съ широкой закругленной вершиной, въ результатѣ получится кривая, подобная фиг. 74. Если одна изъ слагающихъ кривыхъ или обѣ имѣютъ волнистый контуръ, вслѣдствіе присутствія подслагающихъ періодичности высшаго порядка,

Фиг. 73.



Фиг. 74.



[1]) См., напр., кривыя данныя Флемингомъ для нѣсколькихъ альтернаторовъ, примѣняемыхъ въ лондонскомъ City (The Electrician 22 February 1895).

то и контуръ получающейся отъ ихъ сложенія кривой будетъ тоже волнистый. Этотъ случай соотвѣтствуетъ неимѣющему особаго значенія случаю двигателя, предназначеннаго для работы съ вращающимся магнитнымъ полемъ, въ которомъ амплитуда результирующей магнитной силы, испытываетъ болѣе быстрыя періодическія измѣненія.

Въ предыдущихъ параграфахъ сложеніе векторовъ было преднамѣренно разсмотрѣно съ отвлеченной или кинематической точки зрѣнія. Явленія вращенія въ многофазныхъ двигателяхъ одновременно и болѣе конкретны и болѣе сложны. Въ нихъ создаваемое магнитное поле рѣдко имѣетъ простое равномѣрное круговое вращеніе. Они по большей части многополюсные; имѣютъ выдающіеся полюсные наконечники, зубья и другія неоднородности строенія, которыя всѣ болѣе или менѣе стремятся заставить магнитное поле вращаться скачками и мѣнять напряженіе въ различныхъ точкахъ. Однако, это обстоятельство не имѣетъ особенно большого значенія, такъ какъ, какъ мы увидимъ далѣе, всѣ явленія индукціи въ проводящихъ вращающихся массахъ имѣютъ стремленіе противодѣйствовать всякому отклоненію отъ простого равномѣрнаго вращенія. Далѣе въ идеальномъ случаѣ добиваются, не равномѣрно вращающагося магнитнаго поля, но такой комбинаціи вращающагося магнитнаго поля съ цѣлымъ рядомъ индуктированныхъ токовъ, при которой проводники, съ токами (или желѣзный сердечникъ, въ которомъ проводники помѣщены) приводился бы въ достаточно равномѣрное вращеніе вокругъ своей оси и притомъ съ достаточной силой. Вращающее усиліе не одинаково при всѣхъ положеніяхъ и въ паровыхъ машинахъ, даже когда онѣ снабжены двумя или тремя кривошипами. Наоборотъ, даже въ самыхъ худшихъ многофазныхъ двигателяхъ оно гораздо равномѣрнѣе, чѣмъ въ лучшихъ паровыхъ машинахъ. Ни для одного многофазнаго и даже однофазнаго двигателя не требуется маховика для сглаживанія неравномѣрности вращающаго усилія.

Наконецъ, надо помнить, что принципы сложенія векторовъ (наприм., извѣстный параллелограммъ векторовъ), примѣнимъ къ магнитодвижущимъ силамъ, магнитнымъ потокамъ и электрическимъ токамъ, только тогда, когда эти величины разсматриваются какъ *векторы*, т. е., когда принимается во вниманіе ихъ

направленіе въ пространствѣ. Очевидно, слѣдовательно, что они не могутъ быть примѣняемы, когда имѣютъ дѣло съ величинами кругового характера, наприм., съ общей магнитодвижущей силой, или съ общимъ магнитнымъ потокомъ въ цѣпи, или точно также, при сложеніи токовъ идущихъ изъ нѣсколькихъ проволокъ, въ одну общую. Тутъ всѣ эти величины имѣютъ характеръ *скаларовъ*: ихъ направленіе мѣняется повсюду въ цѣпи *). Если мы будемъ разсматривать магнитную силу въ какой-нибудь точкѣ, то мы будемъ имѣть нѣчто, имѣющее вполнѣ опредѣленное направленіе, и можемъ, слѣдовательно, складывать ее съ другой магнитной силой, дѣйствующей въ той же точкѣ. Точно также, если мы будемъ разсматривать магнитныя поля, направленія которыхъ въ опредѣленный моментъ однородны въ разсматриваемомъ пространствѣ, какъ, наприм., въ случаѣ магнитныхъ полей разсматриваемыхъ въ теоремѣ Депре (стр. 67) и въ слѣдующихъ теоремахъ, то принципы сложенія векторовъ прилагать будетъ можно. Но въ многополюсномъ двигателѣ, въ которомъ потокъ имѣетъ кривую форму, какъ это видно на фиг. 24 и фиг. 125, потокъ, какъ цѣлое, не можетъ быть разсматриваемъ, какъ векторъ, и по этой то причинѣ въ главѣ V, при разсмотрѣніи движенія магнитнаго поля, вычерчены діаграммы, показывающія, какъ дѣйствуетъ въ двигателѣ магнитодвижущая сила.

Нужно ясно отличать случаи, когда многоугольникъ векторовъ примѣняется для сложенія *векторовъ* и когда это же самое геометрическое построеніе примѣняется къ сложенію *скаларовъ*, слѣдующихъ синусоидальной зависимости отъ времени. Въ послѣднемъ случаѣ фазовое положеніе складываемыхъ величинъ изображается относительнымъ наклономъ линій. Законность этого процесса сложенія зависитъ исключительно отъ особыхъ свойствъ синусоидальной функціи.

---

*) *Скаларамы* наз. величины, не имѣющія направленія. Величины же, имѣющія опредѣленное направленіе, наз. *векторами*. *Прим. пер.*

ГЛАВА III.

Свойства вращающагося магнитнаго поля.

Смотря, сколько вниманія было посвящено магнитнымъ полямъ и комбинаціямъ полей, производимыхъ двумя или нѣсколькими магнитами, приходится удивляться, почему такъ мало вниманія было удѣлено свойствамъ вращающагося магнитнаго поля. Сущность современнаго многофазнаго двигателя состоитъ въ воспроизведеніи вращающагося магнитнаго поля, въ которомъ вслѣдствіе взаимодѣйствія между токами, индуктируемыми въ нихъ и полемъ принуждены вращаться металлическія массы. Эти вращающіяся магнитныя поля получаются при помощи комбинаціи двухъ или нѣсколькихъ колебательныхъ магнитныхъ полей, получающихся, какъ это было уже показано, при помощи перемѣнныхъ токовъ различныхъ фазъ. Главнѣйшія свойства вращающихся полей, могутъ быть получены и показаны, однако и иначе, помощью очень простыхъ средствъ. Для этого требуется только приспособленіе для вращенія магнита, магнитное поле котораго изучается во время вращенія его съ опредѣленной скоростью.

На вращающееся поле обратили вниманіе впервые въ 1825 г., при изученіи особаго явленія вращенія, открытаго Араго, относительно котораго поэтому мы и скажемъ нѣсколько словъ.

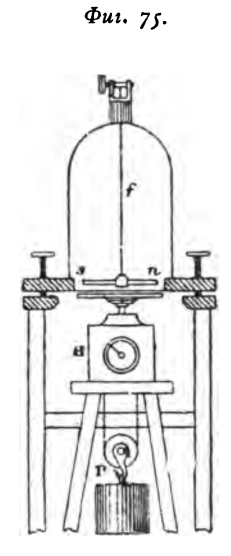
Вращенія Араго. Какъ это часто случается въ наукѣ, открытіе магнитныхъ вращеній, было сдѣлано почти одновременно нѣсколькими лицами, для каждаго изъ которыхъ требовали пріоритета. Около 1824 года Гамбей (Gambey) [1], извѣстный инстру-

[1]) См. *Jamin* «Cours de Physique», Ш 296, 1869 и *Verdet* «Confèrance de Physique» I, 415, 1872.



ментальный мастеръ въ Парижѣ, замѣтилъ случайно, что магнитная стрѣлка въ компасѣ, если ее вывести изъ положенія равновѣсія, прекращаетъ качаться быстрѣе, если дно компасной коробки сдѣлано изъ мѣди, чѣмъ, если оно сдѣлано изъ дерева или другого металла. Барловъ и Марчъ [1]), въ Вульвичѣ замѣтили въ то же время вліяніе на магнитную стрѣлку желѣзнаго шара, вращающагося вблизи нея. Астрономъ Араго [2]), который, какъ говорятъ одни, узналъ объ этомъ явленіи отъ Гамбея, или какъ говорятъ другіе, открылъ его самостоятельно въ 1822 году во время работы съ Гумбольдтомъ надъ магнитными опредѣленіями, былъ несомнѣнно первымъ, опубликовавшимъ свои наблюденія, которыя онъ ранѣе еще устно изложилъ въ собраніи Парижской Академіи Наукъ, 22-го ноября 1824 года. Онъ подвѣшивалъ магнитную стрѣлку внутри колецъ изъ различныхъ веществъ, отклонялъ ее на 45° и затѣмъ считалъ число качаній, которое сдѣлаетъ стрѣлка, пока уголъ отклоненія не уменьшится до 10°. Въ деревянномъ кольцѣ это число было 145, въ тонкомъ мѣдномъ кольцѣ—66, а въ массивномъ мѣдномъ же кольцѣ всего 33.

Фиг. 75.



Вращающійся дискъ Араго.

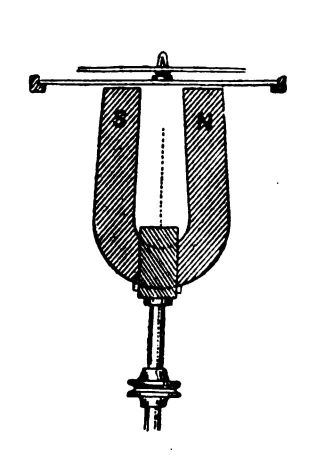
Присутствіе мѣдной массы успокаиваетъ колебанія стрѣлки. Каждое колебаніе продолжается столько же времени, сколько и раньше, но амплитуды уменьшаются: движеніе ослабляется такъ, какъ будто ему препятствовало бы какое-нибудь невидимое треніе. Араго замѣтилъ, что это обстоятельство обнаруживаетъ существованіе силы, появляющейся только тогда, когда происходитъ относительное перемѣщеніе магнитной стрѣлки и мѣдной массы. Онъ далъ описанному явленію названіе *магнетизма вращенія*. Въ 1825 году онъ опубликовалъ другой опытъ, въ кото-

---

[1]) Edinburgh Philos. Journal XIII, 122, 1825.
[2]) Annales de Chimie et de Physique XXVII, 365; XXVIII, 325; XXXII, 213.

ромъ, исходя изъ принципа равенства дѣйствія и противодѣйствія, онъ произвелъ вращеніе магнитной стрѣлки, вращая мѣдный дискъ (фиг. 75). Подвѣсивъ магнитную стрѣлку въ стеклянномъ сосудѣ, дно котораго онъ закрывалъ бумагой или стеклянной пластинкой, Араго помѣщалъ сосудъ надъ вращающимся мѣднымъ дискомъ. Если этотъ дискъ вращается медленно, то стрѣлка только отклонится отъ магнитнаго меридіана, стремясь повернуться въ сторону вращенія диска, какъ будто бы дискъ невидимо увлекалъ стрѣлку за собой. При болѣе быстромъ вращеніи отклоненіе становится большимъ. Если, наконецъ, вращеніе станетъ настолько быстрымъ, что стрѣлка отклонится на уголъ большій чѣмъ 90°, то она придетъ тоже въ непрерывное вращеніе. Однако, Араго нашелъ, что сила взаимодѣйствія не будетъ просто тангенціальной (т. е. направленной по касательной). Подвѣшивая стрѣлку вертикально на коромыслѣ вѣсовъ и помѣщая ее надъ вращающимся дискомъ, онъ замѣтилъ, что стрѣлка отталкивается, когда дискъ начинаетъ вращаться. Изъ этого онъ заключилъ, что на полюсъ находившійся вблизи диска, дѣйствовали также радіальныя силы (т. е. направленныя по радіусу), стремившіяся оттолкнуть его наружу, если полюсъ находился около края диска и внутрь, если полюсъ находился около центра диска.

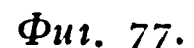
Фиг. 76.



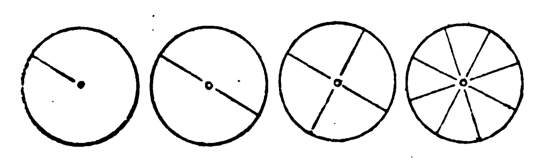
Опытъ Бабаджа и Гершеля.

Пуассонъ, основываясь на взглядахъ Кулона на магнитныя дѣйствія на разстояніе, пробовалъ построить теорію магнетизма вращенія, утверждая, что всѣ вещества въ присутствіи магнитовъ пріобрѣтаютъ нѣкоторое временное намагниченіе, которое въ мѣди исчезаетъ медленнѣе, чѣмъ въ другихъ веществахъ. Напрасно Араго указывалъ на то, что теорія эта не согласуется

съ фактами, такъ называемый «*магнетизмъ вращенія*» грозилъ стать установленной идеей. Въ такомъ видѣ явленіе было изучаемо нѣсколькими англійскими экспериментаторами, Бобаджемъ и Гершелемъ, Кристи и позднѣе Стюрженомъ и Форадеемъ. Бобаджъ и Гершель измѣряли величину задерживающей силы, съ которой дѣйствуютъ на стрѣлку различныя вещества и нашли, что наиболѣе сильно дѣйствуетъ серебро и мѣдь (оба наилучшіе проводники электричества), затѣмъ золото и цинкъ, тогда какъ сви-



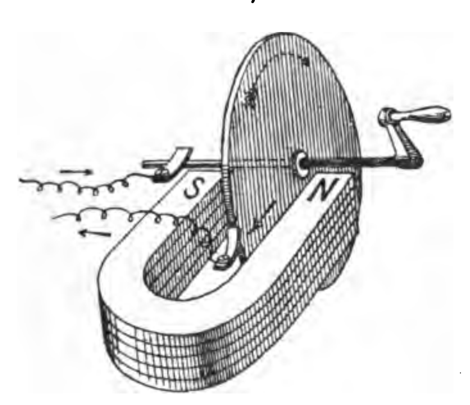
Фиг. 77.



Разрѣзанные диски употреблявшіеся Бабаджемъ и Гершелемъ.

нецъ, ртуть и висмутъ дѣйствуютъ гораздо слабѣе. Въ 1825 г. они опубликовали опытъ, обратный опыту Араго, въ которомъ

Фиг. 78.



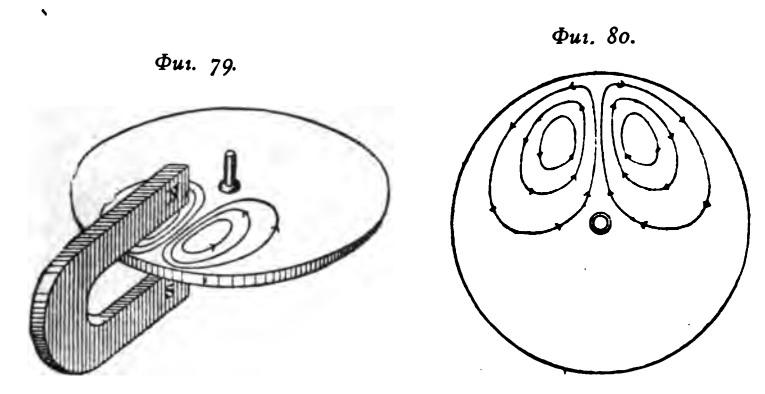
Дискъ Фарадея.

врашая магнитъ, помѣщенный подъ мѣднымъ дискомъ, могущимъ вращаться на остріѣ (фиг. 76), они заставили этотъ дискъ тоже прійти въ быстрое вращеніе. Они сдѣлали также весьма

важное наблюденіе, что радіальные прорѣзы въ дискѣ значительно уменьшаютъ въ немъ стремленіе вращаться при вращеніи магнита (фиг. 77). Если принять вращательную силу въ дискѣ безъ прорѣзовъ за 100, то одинъ радіальный прорѣзъ уменьшаетъ ее до 88, два прорѣза — до 77, четыре прорѣза — до 48 и восемь прорѣзовъ — до 24. Амперъ въ 1826 г. показалъ, что вращающійся мѣдный дискъ тоже стремится привести во вращеніе близъ лежащую мѣдную проволоку, по которой проходитъ токъ. Зебекъ въ Германіи, Прево и Колладонъ въ Швейцаріи, Нобили и Бачелли въ Италіи, подтвердили наблюденія англійскихъ экспериментаторовъ и добавили рядъ новыхъ. Стюрженъ показалъ, что успокаивающее дѣйствіе магнитнаго полюса на подвижной мѣдный дискъ уменьшается въ присутствіи другаго противоположнаго полюса, помѣщеннаго рядомъ съ первымъ. Пятью годами позже онъ вернулся къ этому предмету и пришелъ къ заключенію, что это явленіе электрическаго характера: «родъ реакціи, подобной происходящей въ электромагнетизмѣ», когда опубликованіе блестящихъ изслѣдованій Фарадея надъ магнитоэлектрической индукціей (въ 1831 г.), предупредило полное объясненіе, къ которому онъ приближался. Дѣйствительно, Фарадей показалъ, что относительное перемѣщеніе магнита и мѣднаго диска неизбѣжно вызыветъ появленіе токовъ въ массѣ металла диска, которые, въ свою очередь, дѣйствуютъ на магнитный полюсъ, причемъ взаимодѣйствіе стремится уменьшить относительное перемѣщеніе, т. е. стремится увлечь неподвижную часть (магнитъ или дискъ безразлично) въ сторону подвижной части и воспрепятствовать движенію подвижной части. Токи принимаютъ видъ вихрей въ подвижномъ дискѣ, если только ихъ не отвести помощью скользящихъ контактовъ. Это и сдѣлалъ на самомъ дѣлѣ Фарадей, помѣстивъ мѣдный дискъ сгоймя (фиг. 78), между полюсами сильнаго магнита, и вращая его вокругъ оси. Для отвода тока на окружность и на ось опирались пружинные контакты. Электродвижущая сила, дѣйствующая подъ прямымъ угломъ къ направленію движенія и къ линіямъ магнитнаго поля, производитъ токи, идущіе по радіусамъ диска. Если для нихъ нѣтъ никакого внѣшняго пути, то они должны сами находить внутренній путь для возврата въ металлѣ диска. На фиг. 79 показаны

пути двухъ такихъ вихрей въ мѣдномъ дискѣ, вращающемся между полюсами магнита. Эти вихри расположены симметрично [1]) относительно радіуса максимальной электродвижущей силы (фиг. 80). Направленіе вихревыхъ токовъ будетъ всегда таково, что они будутъ стремиться препятствовать относительному перемѣщенію. Вихревой токъ въ той части диска, которая удаляется отъ полюсовъ, стремится потянуть полюсы впередъ или передвинуть эту часть диска назадъ. Вихревой токъ въ части диска, приближающійся къ полюсамъ стремится оттолкнуть эти полюсы и быть оттолкнутымъ ими. Очевидно, что всякій прорѣзъ, сдѣланный въ дискѣ будетъ стремиться ограничить прохожденіе

Фиг. 79. *Фиг. 80.*



Паразитные токи во вращающемся дискѣ. Пути паразитныхъ токовъ.

этихъ вихревыхъ (или *паразитныхъ*) токовъ, и увеличить тѣмъ сопротивленіе ихъ путей въ металлѣ, причемъ электродвижущая сила, конечно, не уменьшается. Въ изслѣдованіяхъ Стюржена [2]) описано много опытовъ, имѣющихъ цѣлью опредѣлить, по какому направленію идутъ въ дискѣ токи. Подобныя же, но болѣе полныя изслѣдованія были сдѣланы Матеуччи. Индукція въ вращаю-

---

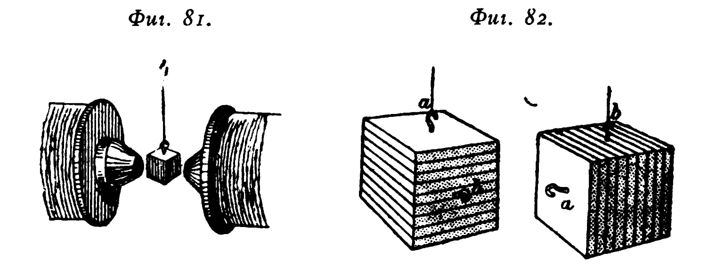
[1]) Если только скорость вращенія не будетъ *очень* велика. Въ послѣднемъ случаѣ самоиндукція вызоветъ отставаніе по времени, вслѣдствіе чего положеніе радіуса наибольшей силы тока будетъ перемѣщено впередъ относительно радіуса наибольшей электродвижущей силы.

[2]) Edinbourgh Phil. Journ. July 1825; Phil. Mag. April und May 1832. См. также «Scientific Researches» Стюржена, стр. 211.

щихся шарахъ была математически изслѣдована Іохманомъ и позже знаменитымъ Герцомъ.

Фарадей продѣлалъ съ паразитными токами много весьма интересныхъ опытовъ. Между прочимъ онъ подвѣшивалъ на закрученной нити между полюсами сильнаго электромагнита, мѣдный кубъ (фиг. 81). Пока въ электромагнитѣ токъ не замкнутъ, кубъ, раскручивая своимъ вѣсомъ нить, вертится быстро. При замыканіи тока въ электромагнитѣ, т. е. при его намагниченіи, кубъ быстро останавливается, но вновь начинаетъ вращаться, какъ только токъ въ электромагнитѣ будетъ разомкнутъ. Матеуччи нѣсколько измѣнилъ этотъ опытъ, устроивъ кубъ изъ квадратныхъ мѣдныхъ пластинокъ, отдѣленныхъ другъ отъ друга

Фиг. 81. *Фиг. 82.*



листами бумаги. Такой пластинчатый кубъ (фиг. 82), будучи подвѣшенъ въ магнитномъ полѣ за крючокъ *a* такъ, чтобы его пластинки были параллельны линіямъ магнитныхъ силъ, не будетъ прекращать вращаться при замыканіи тока въ электромагнитѣ. Но если его подвѣсить за крючокъ *b*, такъ, чтобы его пластинки были въ вертикальной плоскости, то его вращеніе при замыканіи тока въ электромагнитѣ быстро останавливается. Паразитные токи могутъ существовать только въ послѣднемъ случаѣ, т. к. для нихъ необходимы пути въ плоскостяхъ перпендикулярныхъ къ магнитнымъ линіямъ. Послѣ того, какъ Фарадей объяснилъ, что вращенія Араго происходятъ вслѣдствіе появленія индуктированныхъ паразитныхъ токовъ, особый интересъ, который они возбуждали, пока ихъ причина была неизвѣстна, повидимому совсѣмъ исчезъ. Правда, нѣсколькими годами позже, когда Фуко показалъ, что паразитные токи въ состояніи нагрѣть мѣдный

дискъ, вращаемый въ магнитномъ полѣ, онъ возбудился вновь. Почему это наблюденіе Фуко послужило причиной, что паразитные токи, открытые Фарадеемъ для объясненія явленія Араго были названы токами Фуко,—неясно. Если уже кто нибудь имѣлъ право на то, чтобы паразитные токи были названы его именемъ, то это конечно были Араго или Фарадей, а никакъ не Фуко.

Нѣсколько позже Ле-Ру показалъ парадоксальный опытъ, что мѣдный дискъ, вращаемый между концентрическими магнитными полюсами, не нагрѣвается и не испытываетъ никакого дѣйствія, сопротивляющагося вращенію. Объясненіе этого явленія слѣдующее: Если кольцеобразный сѣверный полюсъ находится съ одной стороны противъ диска, а кольцеобразный же южный полюсъ съ другой, то образуется магнитное поле, перпендикулярное къ диску, и въ немъ паразитныхъ токовъ не будетъ, такъ какъ кругомъ по всему диску будутъ существовать равныя электродвижущія силы, направленныя по радіусамъ или внутрь, или внаружу. Для токовъ не будетъ обратнаго пути ни по одному изъ радіусовъ диска. Въ результатѣ только потенціалъ периферіи станетъ нѣсколько отличнымъ отъ потенціала центра, но тока никакого не будетъ, т. к. электродвижущія силы въ каждомъ замкнутомъ пути внутри диска будутъ уравновѣшены.

Въ 1884 г. Смитъ (Willoughby Smith) опубликовалъ [1]) свои наблюденія надъ вращающимися металлическими дисками, изъ которыхъ слѣдуетъ, что въ желѣзномъ дискѣ образуются электродвижущія силы большія, чѣмъ въ мѣдномъ того же размѣра.

Гютри и Бойсъ [2]) въ 1879 г., подвѣшивая на нити мѣдную, пластинку надъ вращающимся магнитомъ, нашли, что крученіе нити прямо пропорціонально скорости вращенія. Они нашли, что такой приборъ можетъ служить для весьма точнаго опредѣленія скорости вращенія машинъ. Они сдѣлали также рядъ опытовъ надъ вліяніемъ разстоянія между мѣдной пластинкой и магнитомъ и вліяніемъ толщины и діаметра пластинки.

---

[1]) Лекція въ Royal Institution «*Volta and Magneto Electric Induction*». Іюнь, 1884 г.

[2]) *Proc. Physical Soc.* III, pr III, 127 and IV, 55.



Опыты дѣлались съ различными металлами и было найдено, что вращающая пара мѣняется пропорціонально проводимости металловъ, которую они имѣютъ послѣ прокатки въ пластины. Гютри и Бойсъ примѣнили этотъ методъ для измѣренія проводимости жидкостей.

Въ 1880 г. Де-Фонвіелль и Лонтенъ замѣтили, что легко вращающійся мѣдный дискъ, если его разъ на всегда привезти во вращеніе, можно затѣмъ поддерживать во вращеніи, помѣщая его вблизи магнита внутрь прямоугольной катушки изъ мѣдной проволоки (подобной употреблявшимся въ старыхъ гальванометрахъ), по которой пропускаются перемѣнные токи отъ обыкновенной Румкорфовой катушки. Они назвали свой приборъ электромагнитнымъ гироскопомъ.

Несмотря на эти опыты, повидимому ранѣе 1879 г. (см. главу IV) никому въ голову не приходило, что вращеніемъ Араго можно воспользоваться для устройства двигателя.

Опыты съ вращающимся магнитнымъ полемъ. Съ простымъ приборомъ, изображеннымъ на фиг. 76, можно уже показать много весьма интересныхъ и легко выполнимыхъ опытовъ. Магнитная стрѣлка, помѣщаемая на остріе надъ магнитомъ, вращается синхронично съ нимъ. Если помѣстить надъ вращающимся магнитомъ нѣсколько магнитныхъ стрѣлокъ, то всѣ онѣ будутъ вращаться въ унисонъ. Всякій дискъ изъ тонкаго листового желѣза (ферротипная пластинка или жесть) тоже вращается синхронично съ магнитомъ. Желѣзное или стальное перо, помѣщенное на стеклянную пластинку надъ магнитомъ, начинаетъ вращаться немедленно послѣ того, какъ начнетъ вращать магнитъ, и достигнетъ значительной скорости, вращаясь всегда синхронично съ магнитомъ. То же случится съ маленькимъ желѣзнымъ ключемъ. Однако, если сначала привести магнитъ въ очень быстрое вращеніе и только тогда положить перо или ключъ, то онъ не будетъ въ состояніи впасть въ синхронизмъ и не придетъ поэтому во вращеніе. Весьма интересное и красивое явленіе получается, если начать на стеклянную пластинку (лучше всего зеркальную), помѣщенную надъ тихо вращающимся магнитомъ, сыпать изъ перечницы желѣзныя опилки. Такъ какъ магнитное поле, создаваемое полюсами, имѣетъ вертикальную

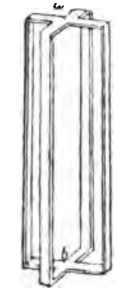
составляющую, то каждая кучка опилокъ подымается вверхъ, когда полюсъ проходитъ подъ ней и дѣлаетъ такой прыжокъ при каждомъ полномъ оборотѣ магнита. При каждомъ прыжкѣ кучки опилокъ перемѣщаются нѣсколько въ сторону обратную движенія магнита, производя впечатлѣніе, при увеличивающейся скорости вращенія, частицъ вальсирующихъ и стремящихся или собраться вмѣстѣ въ центрѣ, или выйти изъ поля на края стеклянной пластинки.

Желѣзные шарики и пуговицы вращаются синхронично съ магнитомъ. Шарики же или угловатые кусочки изъ мѣди или латуни вращаются гораздо медленнѣе и не находятся постоянно надъ магнитомъ, какъ это дѣлаютъ предметы изъ магнитныхъ матерьяловъ. Дискъ изъ мѣди, латуни, цинка или, лучше всего, изъ аллюминія, помѣщенный надъ магнитомъ, приходитъ тоже въ медленное, не синхроничное вращеніе, производимое появляющимися въ немъ паразитными токами.

Если вращающіеся диски, магнитныя стрѣлки и т. п. помѣщены не центрально относительно вращающагося магнита, (т. е. не внутри окружности описываемой полюсами магнита) но на нѣкоторомъ разстояніи въ бокъ, совершенно внѣ пути вращающихся полюсовъ, то диски будутъ вращаться въ направленіи обратномъ направленію вращенія магнита. Если помѣстить дискъ, центрально надъ магнитомъ на 15—20 сант. выше его полюсовъ, и затѣмъ постепенно отодвигать его въ сторону, то можно найти положеніе, при которомъ дискъ не будетъ стремиться вращаться ни въ ту, ни въ другую сторону. По одну сторону зоны, заключающей такія центральныя точки, дискъ будетъ стремиться вращаться въ одномъ направленіи съ магнитомъ, по другую ея сторону—въ обратномъ. Нейтральная зона становится шире, при увеличеніи разстоянія отъ полюсовъ. Когда дискъ помѣщенъ въ центральной зонѣ, его все-таки можно заставить вращаться, помѣщая въ пространствѣ между дискомъ и полюсами куски желѣза или даже мѣди, такъ, чтобы они или деформировали магнитное поле или создавали при помощи паразитныхъ токовъ новое вращающееся поле. Если помѣстить надъ вращающимся магнитомъ клѣтку изъ мѣдныхъ полосъ, подобную изображенной на фиг. 83, и надъ верхушкой ея *a* помѣстить алю-

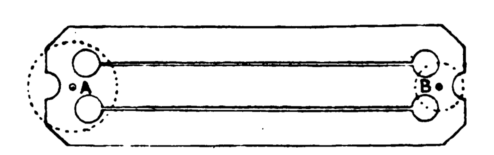
миніевый дискъ, то дискъ можетъ быть приведенъ во вращеніе, хотя бы разстояніе отъ него до магнита было бы слишкомъ велико для того, чтобы дискъ пришелъ во вращеніе безъ этого вспомогательнаго приспособленія. Дѣйствіе его еще усилится, если въ *b* помѣстить желѣзную массу, которая увеличитъ индуктивное дѣйствіе магнита.

Фиг. 83.



Другой весьма поучительный опытъ, показанный авторомъ этой книги въ февралѣ 1894 года въ Royal Institution, можетъ быть произведенъ при помощи куска листовой мѣди, имѣющаго форму, указанную на фиг. 84, въ которомъ прорѣзаны почти по всей длинѣ двѣ щели. Доска можетъ имѣть длину въ метръ слишнимъ при ширинѣ въ 8—10 сантиметровъ. Если положить доску горизонтально, такъ, чтобы точка *A* приходилась надъ центромъ вращающагося магнита и надъ магнитомъ, для увеличенія его индуктивнаго дѣйствія, положить на доску кусокъ желѣза,

Фиг. 84.

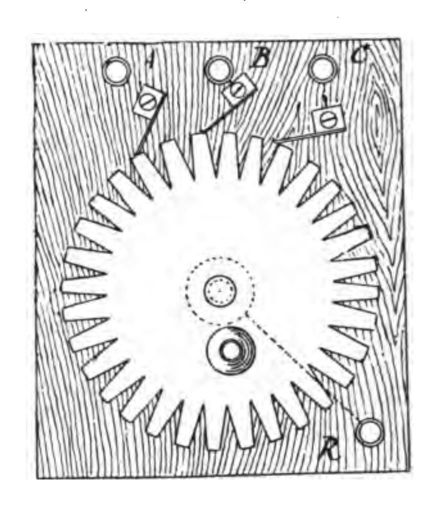


то въ доскѣ появятся паразитные токи (на самомъ дѣлѣ трехфазные паразитные токи), которые будутъ въ состояніи привести во вращеніе металлическій дискъ, помѣщаемый на остріѣ на другомъ концѣ доски *B*. Дискъ, которымъ пользовался при своемъ опытѣ авторъ, состоялъ изъ мѣднаго диска съ выступающимъ ободомъ, внутри котораго помѣщался желѣзный дискъ меньшихъ размѣровъ. Для уменьшенія тренія система была снабжена агатовымъ центромъ. Всѣ эти явленія можно сдѣлать гораздо болѣе интенсивными, замѣняя вращаемый механически стальной магнитъ какимъ нибудь приборомъ, образующимъ вращающееся магнитное поле, помощью комбинаціи многофазныхъ токовъ, подобнымъ описываемымъ дальше.

Въ случаѣ, когда не имѣется въ распоряженіи прибора, который давалъ бы настоящіе многофазные токи, но имѣется баттарея, могущая доставлять токъ въ 5—10 амперовъ при 10—20 вольтахъ и больше, можно получить подобіе многофазныхъ токовъ при помощи особаго коммутатора, приводимаго во вращеніе рукой.

На фиг. 85 изображена весьма простая форма такого коммутатора, при помощи котораго можно получить вращающееся магнитное поле, если его зажимы A, B и C соединить съ зажимами m, o и n кольца, снабженнаго обмоткой, подобной изображенной на фиг. 58, а зажимы баттареи—одинъ съ зажимомъ R коммутатора, другой—съ общимъ зажимомъ J обмотокъ кольца. При быстромъ вращеніи рукоятки коммутатора черезъ три контактныя пружины проходятъ черезъ интервалы токи, которые можно считать разнящимися по фазѣ на 120°, хотя, конечно, перемѣнъ направленія тока тутъ нѣтъ. Надо замѣтить, что интервалы равняются углу въ 60°, вслѣдствіе чего токъ въ B замкнется на $^1/_6$ періода раньше, чѣмъ разомкнется токъ въ A и въ продолженіи $^1/_6$ періода токъ будетъ существовать только въ B, послѣ чего въ теченіе $^1/_6$ періода будетъ существовать токъ въ B и C и т. д. Контактная поверхность зубцовъ равняется половинѣ разстоянія между ихъ центрами и прикасающіяся части контактныхъ пружинъ дѣлятъ это разстояніе на три части. Такой коммутаторъ легко вырѣзать изъ листа латуни и, хотя подъ дѣйствіемъ искръ онъ скоро портится, однако его также скоро можно и починить.

Фиг. 85.

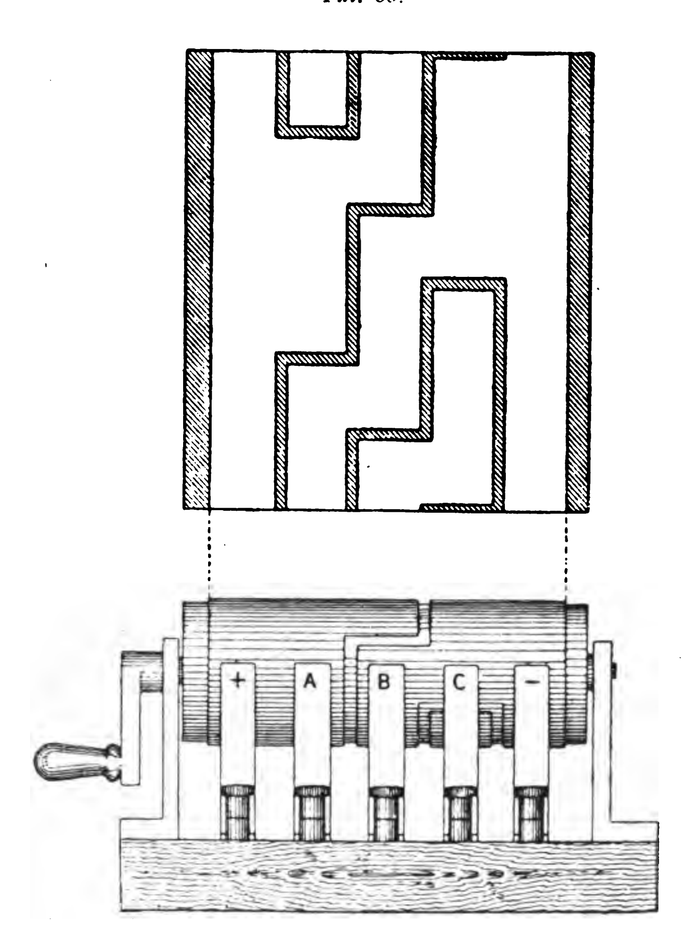


Ручной коммутаторъ для полученія токовъ, подобныхъ трехфазнымъ.

Болѣе совершенный коммутаторъ, который *мѣняетъ направ-*

леніе токовъ въ трехъ линіяхъ въ соотвѣтствующемъ порядкѣ и не требуетъ четвертой линіи (возвратнаго провода), изображенъ на фиг. 86. Онъ состоитъ изъ деревяннаго вала приблизительно

Фиг. 86.



Ручной коммутаторъ для воспроизведенія трехфазныхъ токовъ.

въ 5 сант. въ діаметрѣ и 12,5 сант. длиной, къ которому привинчены двѣ, расположенныя соотвѣтственнымъ образомъ, кон-

тактныя пластинки. На этотъ валъ нажимаютъ 5 пружинъ, изъ которыхъ три соединены съ тремя линіями, двѣ же присоединены къ зажимамъ батареи. На прилагаемомъ чертежѣ дана развертка вала въ половину натуральной величины, на которой видно, какую форму имѣютъ контактныя пластинки и какъ онѣ расположены.

Слѣдя за направленіемъ тока въ теченіе оборота коммутатора, можно убѣдиться, что это направленіе будетъ послѣдовательно мѣняться во всѣхъ трехъ линіяхъ и что, когда токъ изъ зажима + попадаетъ въ линію *A*, то онъ возвращается въ зажимъ — черезъ линію *B* и *C* и т. д. въ правильномъ порядкѣ.

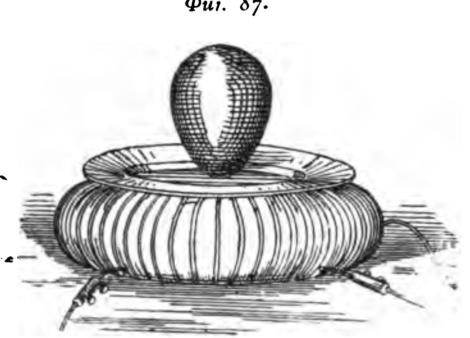
Подобнаго же рода коммутаторъ (но, конечно, съ другимъ расположеніемъ частей) можно примѣнить для полученія токовъ, подобныхъ двухфазнымъ, причемъ придется имѣть уже четыре линіи. Въ коммутаторы уже потребуется шесть пружинъ, если только не примѣнить общей возвратной проволоки. Въ послѣднемъ случаѣ описанный коммутаторъ годится и для двухфазныхъ токовъ, если пружину *C* соединить съ общей возвратной проволокой для двухъ цѣпей, идущихъ отъ пружинъ *A* и *B*.

Для показанія съ помощью трехфазнаго коммутатора простыхъ опытовъ съ вращающимся магнитнымъ полемъ, требуется только обмотанный соотвѣтствующимъ образомъ кольцевой электромагнитъ. Надо взять кольцевой сердечникъ, приготовленный или изъ желѣзной проволоки или изъ колецъ, выштампованныхъ изъ листового желѣза, имѣющій внѣшній діаметръ въ 8—10 сантим. и внутренній въ 5—8 сант. Высота его должна быть около 1½—2 сантиметровъ. Изолировавъ его или лентой или лакированной бумагой, надо плотно намотать на него шесть одинаковыхъ обмотокъ изъ изолированной проволоки въ 1,6 мил. въ діаметрѣ (№ 16 S. W. g.) или для большей гибкости пучкомъ изъ 7 проволокъ въ 0,6 мм. въ діаметрѣ. Каждая обмотка должна покрывать пространство въ 60°. Концы обмотокъ можно снабдить зажимами, при помощи которыхъ ихъ можно соединять или звѣздой или треугольникомъ. Каждая обмотка должна состоять, по крайней мѣрѣ, изъ 100 оборотовъ проволоки. Если для обмотки употребить болѣе тонкую проволоку (что имѣетъ свою хорошую сторону), то обмотку надо дѣлать изъ большаго числа

оборотовъ. Съ маленькимъ кольцевымъ электромагнитомъ, подобнымъ описанному, можно продѣлать почти всѣ перечисленные выше опыты.

Для опытовъ въ большемъ масштабѣ лица, имѣющія въ своемъ распоряженіи постоянный токъ для освѣщенія, могутъ тоже легко получить многофазные токи. Для этого легко приспособить маленькій двигатель, который бы вращалъ трансформаторъ. Положимъ, что для освѣщенія доставляется токъ въ 100 вольтъ. Маленькій двигатель въ 1 силу и даже въ 1/2 и 1/4 силы можетъ быть легко приспособленъ для указанной цѣли, если только на его оси, на концѣ противуположномъ коллектору, есть мѣсто для помѣщенія трехъ изолированныхъ другъ отъ друга колецъ, которыя

Фиг. 87.



должны быть соединены съ тремя симметрично расположенными точками обмотки арматуры. Если заставить нажимать на эти кольца три контактныя пружины, то отъ нихъ можно получить трехфазные токи (см. глава X).

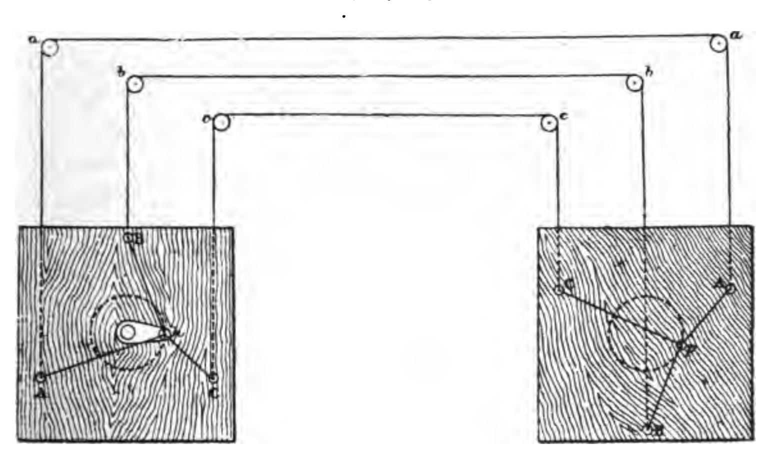
Одинъ изъ самыхъ поразительныхъ опытовъ, которые можно показать съ такими приборами, это вращеніе мѣднаго яйца. Для этой цѣли требуется кольцевой электромагнитъ нѣсколько большихъ размѣровъ, чѣмъ описанный. Кольцо въ 20 сант. въ діаметрѣ, снабженное обмоткой изъ 6 или 12 секцій, соединенныхъ какъ показано на фиг. 58 или 59, будетъ служить отлично. Кольцо съ обмоткой изъ 12 секцій (см. фиг. 157) очень удобно, такъ какъ оно можетъ также служить и для двухфазныхъ токовъ.

Такое кольцо кладется на столъ и на него кладется обыкновенная фарфоровая тарелка. Мѣдное яйцо, сплошное и пустотѣлое, или еще лучше наполненное желѣзными опилками, помѣщенное на подносѣ (фиг. 87), начинаетъ быстро вращаться при пропусканіи тока черезъ электромагнитъ. Скорость вращенія постепенно увеличивается, яйцо начинаетъ вставать и, наконецъ, станетъ на острый конецъ. Алюминіевое яйцо вращается еще лучше. Массивный мѣдный или алюминіевый дискъ, если его сдѣлать слегка выпуклымъ съ одной стороны и закруглить его концы, приходитъ во вращеніе и постепенно подымается, пока не станетъ прямо на своемъ ребрѣ.

Механическія иллюстраціи многофазной передачи.

Уже нѣсколько разъ была указана аналогія между приборами, предназначенными для многофазныхъ токовъ, и машинами, въ которыхъ для избѣжанія мертвыхъ точекъ устроены два или три кривошипа. Можно даже устроить весьма интересныя и по-

Фиг. 88.



учительныя механическія модели соотвѣтствующія различнымъ случаямъ передачи многофазными токами. Для иллюстраціи передачи энергіи трехфазными токами, авторомъ этой книги, устроена слѣдующая простая модель.

Къ концу неболяшой рукоятки *h*, вращающейся вокругъ центра *o*, укрѣпленнаго на подвижной доскѣ (фиг. 88), прикрѣплены три шнурка. Эти шнурки пропущены затѣмъ черезъ три равноотстоящія отверстія *A*, *B* и *C*, снабженныя для уменьшенія тренія фарфоровыми втулками. Далѣе шнурки проходятъ черезъ блоки *a*, и *c* и идутъ къ другой совершенно подобной, доскѣ, находящейся отъ первой на нѣкоторомъ разстояніи. Тамъ ихъ концы соединяются вмѣстѣ и прикрѣпляются къ карандашу *p*. При вращеніи рукоятки *h*, точка *p* тоже совершаетъ круговое движеніе, хотя на второй доскѣ нѣтъ никакой направляющей рукоятки, и карандашъ вычерчиваетъ на доскѣ кривую весьма близкую къ кругу.

Другой методъ механическаго иллюстрированія, въ которомъ тоже примѣняются блоки и шнуры, придуманъ Винандомъ (см. P. A. N. Winand, *Journ. of the Franklin Institute,* October 1892).

ГЛАВА IV.

Исторія многофазныхъ двигателей.

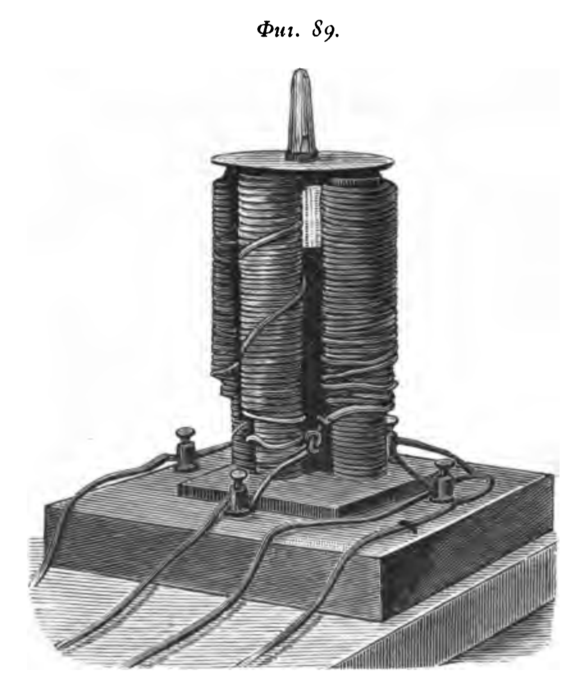
Идея полученія вращенія помощью нѣсколькихъ магнитныхъ полюсовъ, которые дѣйствовали бы одинъ послѣ другаго и такимъ образомъ передвигали якорь впередъ, не принадлежитъ къ числу самыхъ новыхъ. Описаніе многополюсныхъ двигателей можно найти въ нѣкоторыхъ изъ самыхъ раннихъ патентовъ Витстона. Многіе двигатели Пачинотти, изобрѣтенные въ періодъ 1861—65 года, основаны на этой же идеѣ. Однако нигдѣ не проглядываетъ идея, что полюсы могутъ дѣйствовать, индуктируя токи во вращающейся части.

Первый индукціонный двигатель. Между множествомъ современныхъ изобрѣтеній слишкомъ мало вниманія было обращено на скромный прототипъ многофазныхъ двигателей, изобрѣтенный еще въ 1879 г. На фиг. 89 представлена модель двигателя, которую Вальтеръ Байли демонстрировалъ 28 іюня 1879 года въ Лондонскомъ Физическомъ Обществѣ во время своего доклада «Объ одномъ способѣ полученія вращеній Араго».

До этого времени единственный способъ полученія вращенія мѣднаго диска Араго состоялъ во вращеніи подъ нимъ стальнаго магнита. Байли вмѣсто того, чтобы вращать подъ дискомъ какой-нибудь матеріальный магнитъ, поставилъ подъ нимъ неподвижный электромагнитъ, но заставилъ магнитный потокъ проходить послѣдовательно между четырьмя полюсами, развивая такимъ образомъ въ мѣдномъ дискѣ паразитные токи, взаимодѣйствіе которыхъ съ магнитнымъ полемъ сообщаетъ диску вращательное движеніе по направленію перемѣщенія полюсовъ.

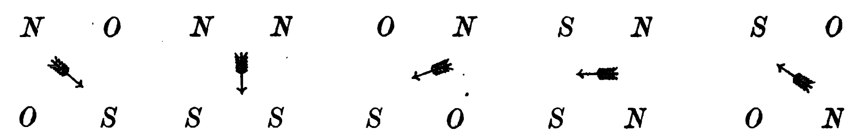
Въ первоначальной модели дискъ имѣлъ діаметръ въ 6 сантиметровъ. Четыре сердечника электромагнита, высотою въ 10 сант. каждый, прикрѣплены къ общей соединительной полосѣ и снабжены каждый обмоткой изъ 150 оборотовъ изолированной проволоки въ 2,5 мил. въ діаметрѣ. Обмотки эти соединены по парно послѣдовательно, совершенно такъ же, какъ если бы вмѣсто одного электромагнита, было два отдѣльныхъ подко-

Фиг. 89.



Многофазный двигатель Вальтера Байли.

вообразныхъ, помѣщенныхъ накрестъ. Свободные концы каждой пары обмотокъ выведены отдѣльно и присоединены къ весьма остроумному коммутатору, устроенному изъ ряда пружинъ и контактныхъ пластинъ, укрѣпленныхъ на деревянномъ валикѣ, снабженномъпроволочной ручкой для вращенія. При вращеніи коммутатора токи, доставляемые двумя батареями, мѣняются въ обмоткахъ такъ, что полярность четырехъ полюсовъ будетъ измѣняться въ слѣдующемъ порядкѣ:



Байли ясно понималъ, насколько въ дѣйствительности такое измѣненіе представляетъ вращающееся магнитное поле. Вотъ его подлинныя слова:

«Вращеніе диска происходитъ вслѣдствіе вращенія магнитнаго поля, въ которомъ онъ помѣщенъ и мы должны ждать, что если подобное вращеніе поля получится какимъ-нибудь инымъ способомъ, то вращеніе диска останется прежнимъ.

Возможно, что механическое вращеніе магнита единственное средство получить равномѣрно вращающееся магнитное поле, но-какъ будетъ показано въ этой статьѣ, можно привести дискъ во вращательное движеніе и при помощи прерывисто-вращающагося поля, получаемаго отъ электромагнитовъ».

Затѣмъ авторъ разсматриваетъ результаты, которые даетъ увеличеніе напряженія одного полюса при одновременномъ уменьшеніи напряженія сосѣдняго полюса того же знака и приходитъ къ заключенію, что, если бы подъ дискомъ вся окружность была уставлена полюсами, которые бы поочередно, попарно (противулежащіе), возбуждались, то всѣ импульсы, которые бы получалъ дискъ стремились бы вращать его вокругъ оси въ одномъ и томъ направленіи. «Только въ одномъ частномъ случаѣ, говоритъ дальше авторъ, именно, когда число электромагнитовъ безконечно велико, мы бы имѣли *равномѣрно* вращающееся поле, подобное получаемому при вращеніи стального магнита».

Затѣмъ авторъ возвращается къ своей модели съ двумя парами полюсовъ aa' и bb' и говоритъ, что, если устроить такъ, что направленіе тока будетъ измѣнено въ парѣ bb' *раньше*, чѣмъ въ парѣ aa', то вращеніе будетъ происходить въ одну сторону; если же направленіе тока въ парѣ bb' будетъ мѣняться *позже*, чѣмъ въ парѣ aa', то направленіе вращенія будетъ обратное. Перемѣна направленія вращенія можетъ быть совершена или перемѣняя дѣйствіе коммутатора или же мѣняя соединенія съ одной или обѣими баттареями. Изъ рисунка, приложеннаго къ цитируемой статьи, видно, что сердечники электромагнитовъ должны

быть пластинчатые, однако на существующей модели они сплошные. Въ послѣднемъ параграфѣ авторъ замѣчаетъ, что явленіе можно значительно усилить, помѣщая надъ дискомъ, противъ нижняго электромагнита, другой подобный же (четырехполюсный) электромагнитъ такъ, чтобы полюсы лежали одинъ противъ другого и имѣли противуположную полярность. Описанная модель дѣйствуетъ прекрасно, при возбужденіи электромагнитовъ четырьмя сухими элементами.

Кстати напомнимъ: когда, пятнадцать лѣтъ тому назадъ, былъ читанъ цитируемый докладъ, покойный проф. Гютри, смѣясь спросилъ, какую мощность можно ожидать получить отъ такого двигателя. Байли скромно отвѣтилъ, что пока онъ можетъ смотрѣть на двигатель, только какъ на научную игрушку.

Изслѣдованія Марселя Депре. Въ 1880 г. Марсель Депре сдѣлалъ во Французскомъ Физическомъ Обществѣ докладъ объ электрической синхронизаціи вращеній. Искусственно получаемые двухфазные токи посылались отъ вращающагося коммутатора въ синхроничный двигатель, состоявшій изъ двухъ челнокобразныхъ арматуръ, укрѣпленныхъ на общемъ валу. Каждая арматура помѣщалась между полюсами отдѣльнаго подковообразнаго магнита, причемъ онѣ были сдвинуты одна относительно другой на уголъ въ 90°, такъ что въ двигателѣ не было мертвыхъ точекъ. На фиг. 90 показано, какъ токъ отъ баттареи попадалъ въ арматуры.

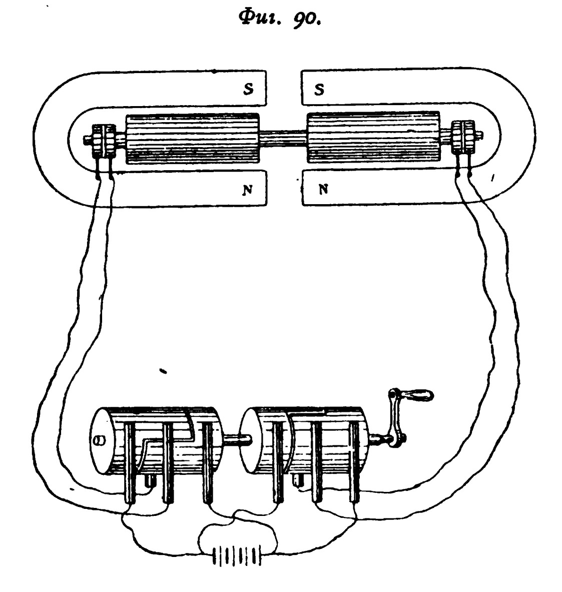
Этотъ приборъ сходенъ съ приборомъ Байли только въ томъ, отношеніи, что оба они требуютъ для вращенія двухфазныхъ токовъ. Оба они могутъ работать и съ двухфазными токами, получаемыми искусственно при помощи коммутаторовъ отъ баттарей, и съ двухфазными періодическими токами, получаемыми помощью индукціи. Приборъ Депре представляетъ изъ себя просто комбинацію двухъ отдѣльныхъ двигателей, помѣщенныхъ подъ прямымъ угломъ съ цѣлью избѣжать мертвыхъ точекъ. Въ этомъ приборѣ нигдѣ не вложена идея о вращающемся магнитномъ полѣ. Идея же двигателя Байли заключается въ полученіи магнитнаго поля, регулярно вращающагося вокругъ центра и развивающаго при помощи индукціи токи во вращающейся металлической массѣ, причемъ эта масса не соединена съ внѣшними токами ни скользящими контактами, ни коммутаторами.

Тремя годами позже Депре высказалъ свою весьма важную теорему, съ которой мы уже познакомились на стр. 67, касающуюся полученія истиннаго вращающагося магнитнаго поля, посредствомъ комбинаціи двухъ перемѣнныхъ токовъ, разнящихся по фазѣ на $^1/_4$ періода.

Теорема Депре не принесла плодовъ: она осталась отвлеченной геометрической теоремой.

Изслѣдованія проф. Феррариса. Въ 1887 г. нѣсколько изслѣдователей работали независимо другъ отъ друга надъ занимающимъ насъ вопросомъ.

Фиг. 90.



Приборъ Марселя Депре.

Туринскій профессоръ Галилео Феррарисъ [1]) уже въ 1885—86 гг. пришелъ къ тѣмъ же основнымъ идеямъ, что и Байли съ Депре. Но результатъ его работъ былъ болѣе плодотворный, такъ какъ онъ, хотя и не зналъ трудовъ ни того, ни другого, руководствовался идеями обоихъ изобрѣтателей. Подобно Байли,

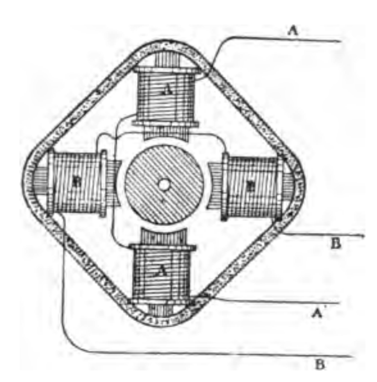
---

1) Ferraris. «*Rotazioni electrodynamiche*». Turin. Acad. Мартъ, 1888.

онъ предложилъ производить вращеніе мѣдной массы при помощи паразитныхъ токовъ, индуктируемыхъ въ ней непрерывно вращающимся магнитнымъ полемъ. Вращающееся же поле онъ предложилъ получать, комбинируя два перемѣнные тока, отличающіеся по фазѣ на 1/4 періода.

Уже въ 1885 г. проф. Феррарисъ построилъ двигатель, изображенный въ разрѣзѣ на фиг. 91, который, однако, былъ публично показанъ только въ 1888 г. Онъ былъ выставленъ въ 1893 г. на всемірной выставкѣ въ Чикаго. Двигатель состоитъ изъ пары электромагнитовъ *AA* и *BB*, имѣющихъ общую соединительную часть, образованною слоемъ желѣзной проволоки обмотанной вокругъ сердечниковъ. Въ двѣ цѣпи электромагнитовъ посылаются два перемѣнныхъ тока, разнящихся по фазѣ, и тогда замѣчается вращеніе центральной части двигателя.

Фиг. 91.

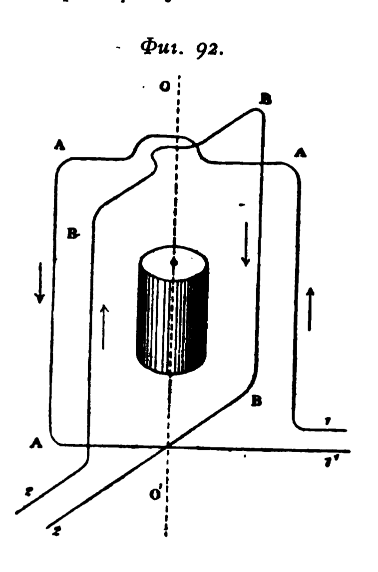


Двигатель Феррариса.

Первый опубликованный трудъ Феррариса, подъ названіемъ: «*Электродинамическое вращеніе, получаемое посредствомъ перемѣнныхъ токовъ*», появился въ мартѣ 1888 г. Въ этомъ трудѣ авторъ, изложивъ геометрическую теорію вращающагося магнитнаго поля, говоритъ, что простѣйшій способъ полученія требуемыхъ токовъ, разнящихся по фазѣ, состоитъ въ развѣтвленіи цѣпи перемѣннаго тока на двѣ, въ одну изъ которыхъ нужно включать сопротивленіе безъ самоиндукціи, въ другую, наоборотъ, катушку съ большой самоиндукціей, но съ малымъ сопротивленіемъ. Обѣ обмотки двигателя должны быть включены соотвѣтственнымъ образомъ въ эти цѣпи. Получаемая, такимъ образомъ разность фазъ достаточно близка къ 90°, для того, чтобы получаемые токи годились для двигателя. Авторъ высказываетъ мысль, что подобнымъ способомъ можно получить всѣ явленія, которыя только получаются при вращеніи магнита. Затѣмъ онъ описываетъ слѣдующіе опыты, сдѣланные имъ осенью 1885 г.

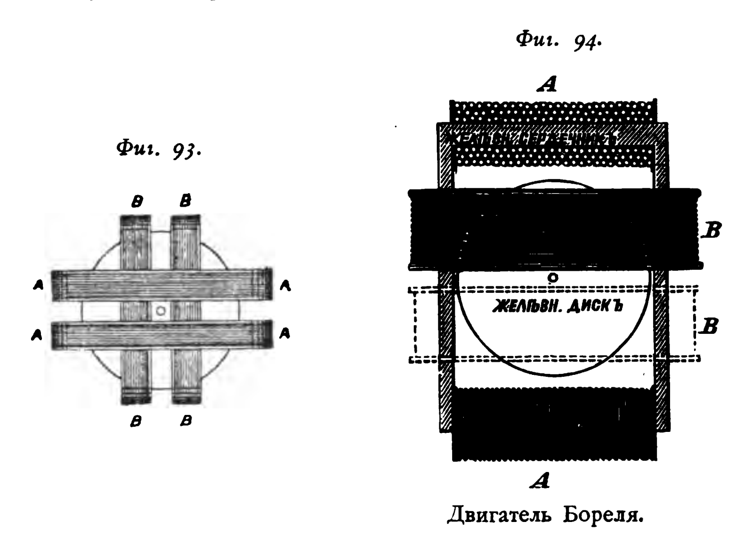
Двѣ плоскихъ катушки, одна изъ толстой, другая изъ тонкой проволоки, схематически изображенныя на черт. 92 линіями *AA* и *BB*, помѣщались подъ прямымъ угломъ другъ относительно друга. Въ первую катушку посылался токъ отъ первичной обмотки трансформатора Голарда, во вторую—отъ его вторичной обмотки, причемъ въ послѣднюю цѣпь включалось большее или меньшее сопротивленіе безъ самоиндукціи. Въ центральномъ внутреннемъ пространствѣ подвѣшивался небольшой пустотѣлый замкнутый мѣдный цилиндръ. При пропусканіи тока черезъ одну какую-нибудь катушку, цилиндръ оставался неподвижнымъ, при пропусканіи же тока черезъ обѣ, онъ немедленно приходилъ во вращеніе. Направленіе вращенія можно было мѣнять простой перемѣной (посредствомъ коммутатора) соединеней второй катушки. Тѣ же самые результаты получались при замѣнѣ мѣднаго цилиндра желѣзнымъ. Пластинчатый желѣзный цилиндръ, помѣщенный на основѣ изъ изолирующаго вещества, тоже приходилъ во вращеніе. Этотъ опытъ прямо наводитъ на мысль устроить двигатель перемѣннаго тока, основываясь на томъ же

Фиг. 92.



принципѣ, но измѣняя нѣсколько конструкцію двигателя, потому что, какъ замѣтилъ проф. Феррарисъ, устроенный подобно предыдущему двигатель былъ бы мало пригоденъ, какъ промышленный преобразователь энергіи. Поэтому онъ спроектировалъ двигатель большихъ размѣровъ, имѣвшій въ качествѣ вращающейся части мѣдный цилиндръ, вѣсомъ въ 10 фунтовъ, длиною въ 18 сант. и діаметромъ въ 8,9 сант. Цилиндръ былъ укрѣпленъ на горизонтальной оси въ 1 сант. діаметр. Онъ былъ окруженъ двумя парами катушекъ *AA* и *BB'*, расположенными подъ прямымъ угломъ (фиг. 93). Двигатель этотъ, однако, вышелъ малой работоспособности. Разбирая элементарную теорію этого прибора

Феррарисъ пришелъ къ заключенію, что индуктивное дѣйствіе пропорціонально *сдвигу*, т. е. разности между угловыми скоростями магнитнаго поля и вращающагося цилиндра, что этому же сдвигу пропорціоналенъ и индуктированный токъ во вращающемся металлѣ, и что наконецъ работоспособность двигателя пропорціональна одновременно сдвигу и скорости вращающейся части. Феррарисъ даже придумалъ измѣрительные приборы для перемѣнныхъ токовъ, основанные на этомъ принципѣ. Затѣмъ онъ перешелъ къ полученію вращенія въ ртути, помѣщенной въ сосудѣ во вращающееся магнитное поле. Въ 1894 г. Феррарисъ опубликовалъ дальнѣйшіе свои труды, касающіеся теоріи такихъ двигателей, съ которой мы познакомимся въ главѣ VIII.



Фиг. 93.

Фиг. 94.

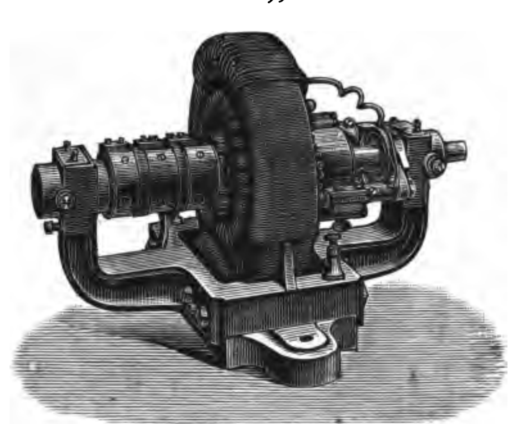
Двигатель Бореля.

Двигатель Бореля. Въ 1887 г. Борель изобрѣлъ двигатель перемѣннаго тока для электрическаго счетчика, получившаго имя счетчика Бореля-Пако. Это былъ двухфазный двигатель, въ которомъ два разнофазныхъ тока получались изъ простого перемѣннаго помощью двухъ цѣпей съ различными постоянными времени. На двухъ сторонахъ желѣзной рамы наматываются двѣ катушки *AA* (фиг. 94) образующія перемѣнное магнитное поле, направленное справа налѣво. Поверхъ рамы помѣщаются двѣ другія катушки *B* (одна изъ нихъ на фиг. 94 снята съ цѣлью

показать внутреннее устройство двигателя), производящія другое перемѣнное магнитное поле, перпендикулярное къ первому. Въ центрѣ этой системы помѣщается желѣзный дискъ, который и приводится во вращеніе образующимся вращающимся полемъ.

Первые двигатели компаніи Helios въ Кельнѣ. Въ 1887 г. кельнская компанія Helios построила по патенту Керпера [1]) нѣсколько маленькихъ двигателей, изъ которыхъ нѣкоторые предназначались для однофазныхъ токовъ и были синхронные и ассинхронные, другіе же были трехфазными двигателями. Одинъ изъ послѣднихъ представленъ на фиг. 95. Онъ имѣетъ три кольца на вращающейся части, посредствомъ которыхъ эта часть получаетъ трехфазные токи. Такъ какъ двигатель требуетъ трехъ

Фиг. 95.



Двигатель Керпера.

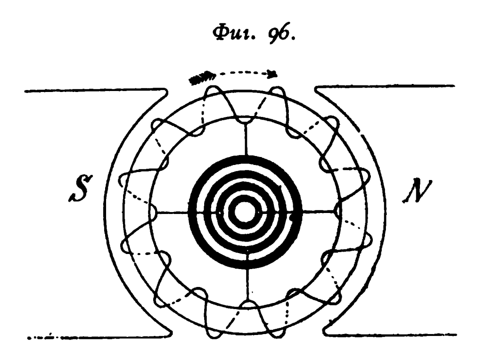
проводниковъ и такъ какъ въ то время всѣ усилія достичь хорошихъ результатовъ съ двумя проводниками были безуспѣшны то компанія Helios оставила этотъ патентъ въ 1890 г. Въ позднѣйшемъ патентѣ 1891 г. описанъ однофазный двигатель съ дополнительной обмоткой, дѣйствующей только на желѣзо вращающейся части и вводящейся только для пусканія двигателя въ ходъ.

[1]) *Specific. of Pat.* № 9013, 1887 г. Также *D. R. P.* 43538, 1887 г. и 70084, 1891 г. См. *Elektr. Zeitschr.* 1893 г., стр. 82.



Двигатель Брадлея. Между первыми американскими піонерами разрабатывавшими многофазные токи находился Чарльзъ Брадлей, работы котораго относятся еще къ 1887 г. Въ его американскомъ патентѣ отъ 8 мая 1887 г. (U. S. patent № 390439, 1887) описанъ генераторъ съ Граммовскимъ кольцомъ, (фиг. 96), въ которомъ четыре симметрично расположенныхъ точки соединены съ четырьмя контактными кольцами. Такимъ образомъ отъ этого генератора можно получить два тока, разнящихся по фазѣ на 90°. Цѣлью такого устройства было полученіе большей мощности, что и справедливо, такъ какъ мощность многофазной машины гораздо больше, чѣмъ какой-либо другой того же вѣса. Въ патентѣ сказано, что такая машина можетъ служить и двигателемъ, хотя ни слова не говорится о свойствахъ вращающагося магнитнаго поля. Параграфъ 9 гласитъ только: «Вращающійся электрическій двигатель, состоящій изъ электромагнита, создающаго поля, арматуры и двухъ приспособленій для приведенія тока, — подобныхъ, напр., контактнымъ кольцамъ и щеткамъ, которыя независимо другъ отъ друга соединены съ обмоткой арматуры въ чередующихся точкахъ и приспособлены для присоединенія къ двумъ независимымъ внѣшнимъ цѣпямъ». Такимъ образомъ въ 1887 г. былъ уже несомнѣнно описанъ многофазный двигатель. Въ октябрѣ 1888 г. (патентъ № 404465) описанъ ассинхронный двигатель, приводимый въ движеніе при помощи соотвѣтственно направленныхъ паразитныхъ токовъ въ неподвижной внѣшней желѣзной массѣ. Вращающійся индукторъ получаетъ, черезъ посредство четырехъ контактныхъ колецъ, двухфазные токи. Весь принципъ магнитнаго сдвига здѣсь выясненъ.

Фиг. 96.



Въ третьемъ патентѣ (№ 409450), опубликованномъ 20 августа 1889 г., Брадлей описываетъ подобную же арматуру, соединенную въ

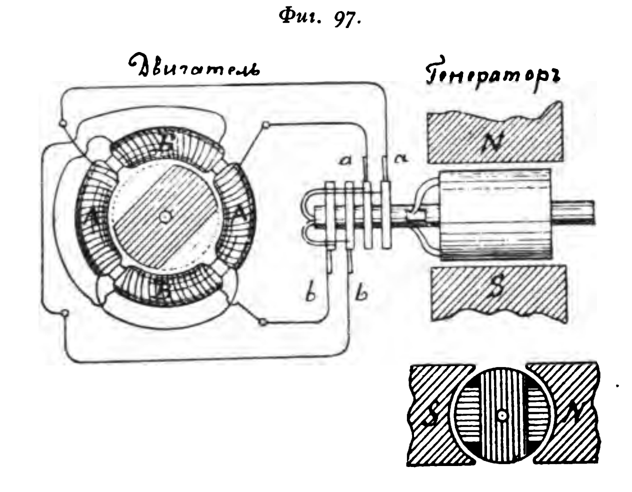
трехъ равноотстоящихъ точкахъ съ тремя контактными кольцами, образуя такимъ образомъ трехфазную систему. Эта машина предназначалась также для работы и въ качествѣ двигателя и въ качествѣ генератора. Въ другомъ патентѣ отъ того же числа, Брадлей указываетъ способъ превращенія однофазнаго перемѣннаго тока въ два, разнящихся по фазѣ, при помощи его машинъ.

Изслѣдованія Николая Тесла. Труды одного Тесла въ теченіе 1887—91 гг. были бы достаточны, если бы даже не было даже другихъ изслѣдователей, для того, чтобы поставить вопросъ о двигателяхъ съ вращающимся полемъ на прочную почву. Въ 1886 г. онъ пришелъ къ твердому убѣжденію, что долженъ существовать какой-нибудь способъ для приведенія во вращеніе арматуры, пользуясь для этого токами, индуктируемыми въ ней, вмѣсто токовъ, посылаемыхъ въ нее (какъ въ обыкновенныхъ двигателяхъ) черезъ посредство металлическихъ контактовъ, коммутаторовъ и щетокъ. Къ октябрю 1887 года труды Тесла подвинулись настолько впередъ, что онъ получилъ возможность уже обратиться въ Patent Office Соединенныхъ Штатовъ за патентами на цѣлый рядъ болѣе или менѣе важныхъ изобрѣтеній. Дальнѣйшія требованія патентовъ поступили въ ноябрѣ и декабрѣ того же года, но ни одинъ изъ нихъ не былъ выданъ патентнымъ бюро до мая 1888 г., когда всѣ они были выданы заразъ.

Въ первомъ изъ описаній помѣщено общее изложеніе идей Тесла. Въ немъ Тесла говоритъ: «Хотя я и описалъ различные способы для достиженія требуемой цѣли, но всѣ они основаны на однихъ и тѣхъ же принципахъ устройства и способа дѣйствія, которыя можно резюмировать слѣдующими словами: употребляется двигатель, въ которомъ имѣется двѣ или больше независимыхъ цѣпей, по которымъ, черезъ соотвѣтствующіе интервалы, проходятъ, какъ указано дальше, перемѣнные токи, такъ, чтобы вызвать согласно извѣстной теоріи постепенное вращеніе магнетизма или «силовыхъ линій», заставляющее двигатель работать. Очевидно, что постепеннымъ вращеніемъ силовыхъ линій можно воспользоваться для приведенія во вращеніе любой изъ частей двигателя: арматуры или индуктора, и что, если токи будутъ направлены въ различныхъ цѣпяхъ соотвѣтственнымъ образомъ, то

никакого коммутатора не потребуется. Чтобы избѣжать всѣхъ коммутаціонныхъ приспособленій, я предпочитаю просто соединять цѣпи двигателя съ цѣпями соотвѣтственно устроеннаго генератора перемѣнныхъ токовъ». Затѣмъ Тесла объясняетъ помощью діаграммы (фиг. 97, взятая изъ патента, гдѣ она помѣщена подъ № 9), какими двумя обмотками снабжается генераторъ, и какъ свободные ихъ концы соединяются съ изолированными контактными кольцами, укрѣпленными на валу. Отъ четырехъ щетокъ, лежащихъ на кольцахъ, идутъ къ двигателю четыре провода. Такая машина есть простой двухфазный гене-

Фиг. 97.



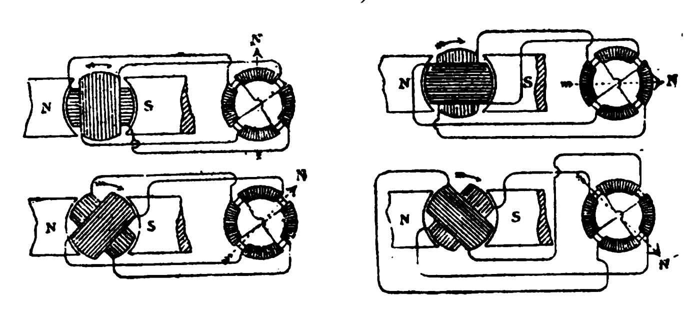
раторъ, дающій два перемѣнныхъ тока, находящихся въ квадратурѣ. Двигатель изображенъ какъ кольцо, составленное изъ пластинокъ, на которомъ намотаны четыре катушки. Двѣ изъ нихъ включены въ цѣпь съ одной парой проводовъ, другія двѣ—съ другой. Всѣ четыре катушки стремятся образовать магнитные полюсы на концахъ одного изъ діаметровъ кольца. Внутри кольца вращается, въ качествѣ ротора *), желѣзный дискъ *D*. Лучше срѣзать у диска два края, такъ чтобы онъ имѣлъ удлиненную форму. Этотъ кусокъ желѣза вращается, стремясь

*) См. гл. V.

Прим. пер.

принять такое положеніе, чтобы черезъ него прошло съ одной стороны кольца въ другую возможно большее число силовыхъ линій. Найдено, что куску желѣза можно и не придавать такой формы, такъ какъ и круглый желѣзный дискъ тоже вращается. Это явленіе Тесла объясняетъ нѣкоторой магнитной инерціей или сопротивленіемъ перемѣщенію магнитныхъ линій и считаетъ подтвержденіемъ этого взгляда то обстоятельство, что стальной круглый дискъ вращается лучше, чѣмъ дискъ изъ мягкаго желѣза. При помощи восьми схематическихъ рисунковъ Тесла показываетъ послѣдовательныя фазы, черезъ которыя проходятъ обмотки генератора въ теченіе одного оборота и соотвѣтствующія измѣненія въ магнетизмѣ, происходящія въ кольцѣ двига-

Фиг. 98.



теля. Результирующее направленіе магнитнаго поля вращается непрерывно (фиг. 98), увлекая за собою желѣзный дискъ.

Эта комбинація эквивалентна двухфазному синхронному двигателю, который работаетъ не индуктированными въ роторѣ токами, но помощью магнитныхъ дѣйствій, и соотвѣтствующему двухфазному генератору, доставляющему токъ.

Одновременно съ этимъ были описаны и другіе двигатели. Одинъ изъ нихъ имѣлъ барабанную арматуру, снабженную двумя обмотками подъ прямымъ угломъ, въ которыя токъ доставлялся помощью четырехъ контактныхъ колецъ. Эта арматура вращалась между двумя частями внѣшней желѣзной или стальной оболочки, которая для *избѣжанія* паразитныхъ токовъ (!) была пластинчатой. Оболочка эта не была снабжена обмоткой и намаг-

ничивалась исключительно вслѣдствіе полярности арматуры. Затѣмъ былъ описанъ трехфазный двигатель и генераторъ, устроенный совершенно такъ же, какъ двухфазный, ранѣе описанный. Генераторъ имѣлъ три вращающіяся катушки и шесть кантактныхъ колецъ. При помощи шести проволокъ онъ соединялся съ кольцомъ двигателя, имѣвшаго шесть катушекъ, надѣтыхъ на шести выдающихся внутрь полюсныхъ наконечникахъ, образующихъ двухполюсное трехфазное поле. Въ качествѣ ротора, какъ и раньше, служилъ желѣзный дискъ или цилиндръ, съ двумя обрѣзанными краями, вслѣдствіе чего онъ имѣлъ удлиненную форму. Послѣ этого описана двухфазная комбинація, въ генераторѣ которой вращается магнитъ, двѣ же пары катушекъ арматуры неподвижны. Въ двигателѣ же по прежнему роторъ, состоящій изъ обрѣзаннаго желѣзнаго диска или цилиндра, окруженъ двумя неподвижными катушками, расположенными подъ прямымъ угломъ. Далѣе указана форма двигателя, въ которомъ имѣется приспособленіе для доставленія двухфазнаго тока какъ во вращающіяся катушки, такъ и во внѣшнія неподвижныя. Было найдено, что въ случаѣ, когда употребляютъ внѣшнюю желѣзную броню или внѣшній неподвижный магнитъ, выгоднѣе имѣть въ нихъ неизмѣнную полярность, возбуждая ихъ постояннымъ токомъ. Такіе двигатели несомнѣнно синхронны.

Трансформаторы для токовъ подобныхъ тѣмъ, которыми пользуются въ описанныхъ системахъ, устраиваются слѣдующимъ образомъ: на пластинчатомъ желѣзномъ кольцевомъ сердечникѣ дѣлаютъ рядъ первичныхъ и рядъ вторичныхъ обмотокъ. Получается намагниченіе постепенное вращающейся полярности.

Въ ноябрѣ появился первый истинно индукціонный двигатель. До тѣхъ поръ Тесла производилъ и поддерживалъ вращеніе «прямымъ притяженіемъ» магнитныхъ элементовъ двигателя. «Я нашелъ, говоритъ онъ, что выгодно въ подобныхъ системахъ примѣнять вращеніе полюсовъ прежде всего для возбужденія токовъ въ замкнутомъ проводникѣ, помѣщенномъ въ полѣ двигателя, причемъ вращеніе получается вслѣдствіе взаимодѣйствія такихъ токовъ и поля». Тесла помѣщалъ внутрь кольца, образующаго вращающееся магнитное поле, цилиндръ или дискъ изъ мягкаго желѣза, снабженный двумя

помѣщенными подъ прямымъ угломъ обмотками изъ изолированной проволоки, концы которыхъ соединены такъ, что каждая обмотка образуетъ отдѣльную замкнутую цѣпь. Такая система укрѣплялась на оси, установленной на подшипникахъ. Въ другомъ двигателѣ роторъ состоялъ изъ желѣзнаго сердечника, составленнаго изъ дисковъ для избѣжанія паразитныхъ токовъ, и снабженнаго снаружи замкнутыми катушками или проводниками, «идущими вдоль цилиндра», образующими одну или нѣсколько замкнутыхъ цѣпей. Если взять роторъ составленный изъ мѣдныхъ пластинокъ, то ихъ надо снабдить продольными прорѣзами. На устройство подобнаго рода двигателя, въ которомъ на вращающейся части примѣняются замкнутыя цѣпи, съ цѣлью получить непрерывное вращеніе магнитной полярности, былъ взятъ спеціальный патентъ. Относительно еще одного требованія на изобрѣтеніе новой системы электрической передачи энергіи нужно привести слова самого Тесла.

«Я знаю, что нѣтъ ничего новаго въ томъ, чтобы получать вращеніе двигателя посредствомъ прерывистаго вращенія полюсовъ одной изъ его частей. Это вращеніе достигается пропусканіемъ черезъ отдѣльныя намагничивающія обмотки одной изъ этихъ частей тока, доставляемаго баттареей или другимъ какимъ-нибудь источникомъ постояннаго тока, причемъ направленіе тока помощью соотвѣтствующихъ механическихъ приспособленій мѣняется такъ, что онъ проходитъ черезъ обмотки поочередно, то въ одномъ, то въ другомъ направленіи. Въ подобныхъ случаяхъ, однако, потенціалъ возбуждающихъ токовъ остается одинъ и тотъ же, мѣняется лишь ихъ направленіе. Теперь же я предлагаю употреблять настоящіе перемѣнные токи и мое изобрѣтеніе состоитъ въ открытіи способа пользованія такими токами.

«Разница между двумя способами полученія вращенія и преимущество моего способа — очевидны. Пользуясь перемѣннымъ токомъ, каждый импульсъ котораго вызываетъ повышеніе и пониженіе потенціала, я воспроизвожу въ двигателѣ всѣ условія работы генератора, и при такихъ токахъ и образуемыхъ ими полюсахъ вращеніе этихъ послѣднихъ будетъ равномѣрное, а не прерывистое. Кромѣ того, практическія трудности прерыванія и коммутированія токовъ сколько-нибудь значительной силы та-

ковы, что ни одно изъ сдѣланныхъ до сихъ поръ изобрѣтеній, требующихъ прерыванія и коммутированія постояннаго тока, не могло быть примѣнено на практикѣ для сколько-нибудь экономической передачи энергіи. Далѣе, что касается дѣйствія на одинъ элементъ двигателя, мое изобрѣтеніе отличается примѣненіемъ перемѣннаго, а не измѣняемаго постояннаго тока, т. е. постояннаго тока, посылаемаго то въ одну, то въ другую обмотку при помощи особыхъ коммутаторовъ, прерывателей и т. п. Что касается части моего изобрѣтенія, относящейся къ одновременному дѣйствію на оба элемента, я смотрю на пользованіе какъ перемѣннымъ, такъ и обращаемымъ токомъ, какъ на свое изобрѣтеніе, хотя я не думаю, чтобы примѣненіе обращаемыхъ токовъ, имѣло какое-нибудь практическое значеніе.

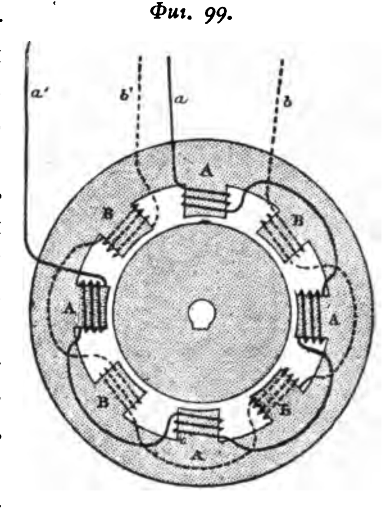
«Я прошу патентъ на слѣдующее изобрѣтеніе:

«На описанный способъ электрической передачи энергіи, состоящій въ полученіи непрерывнаго вращенія полярности въ одной или въ обѣихъ частяхъ двигателя (арматурѣ или индукторѣ) при помощи развитія перемѣнныхъ токовъ въ отдѣльныхъ цѣпяхъ, заключающихъ намагничивающія обмотки одной или обѣихъ частей двигателя, какъ это здѣсь сказано».

Въ апрѣлѣ 1888 г. Тесла нашелъ, что можно въ двухфазной системѣ устроить общій возвратъ и такимъ образомъ уменьшить число проводовъ до трехъ (вмѣсто четырехъ). Онъ показалъ такъ же, какъ можно получать двухфазные токи отъ обыкновенной динамомашины постояннаго тока, снабжая ее четырьмя контактными кольцами, соединенными съ четырьмя симметрично расположенными пластинками ея коллектора. Переходя далѣе къ генераторамъ, которые (подобно извѣстной динамомашинѣ для дуговыхъ лампъ Томсонъ-Гоустона) имѣютъ въ арматурѣ только три секціи, три конца которыхъ соединены вмѣстѣ, а три другіе конца присоединены къ тремъ пластинамъ коллектора, Тесла показываетъ, что, присоединивъ каждый изъ этихъ послѣднихъ концовъ къ отдѣльному контактному кольцу и снабдивъ каждое особой щеткой, можно получить три перемѣнныхъ тока, въ трехъ симметричныхъ фазахъ. Онъ говоритъ, что въ этомъ случаѣ двигатель или трансформаторъ тоже долженъ быть снабженъ тремя возбуждающими катушками, помѣщенными симметрично.

Съ самаго начала своихъ изслѣдованій, у Тесла образовалось повидимому, убѣжденіе въ важности многополюснаго устройства для уменьшенія скорости. Въ маѣ 1888 г. онъ уже придумалъ многополюсный синхронный двигатель и затѣмъ развивалъ это устройство. На фиг. 99 показанъ двигатель съ четырехполюснымъ полемъ, образуемымъ четырьмя полюсами въ цѣпи *A* (попеременно полюсы *N* и *S*) и помѣщенными между ними четырьмя другими полюсами въ цѣпи *B*. Въ этомъ случаѣ движеніе поля не будетъ равномѣрнымъ вращеніемъ. Направленіе поля не будетъ постепенно переходить отъ одного полюса *A* къ сосѣднему *B*. Происходитъ же слѣдующее: когда магнетизмъ полюса *A* ослабѣваетъ, магнетизмъ сосѣдняго полюса *B* усиливается.

Фиг. 99.

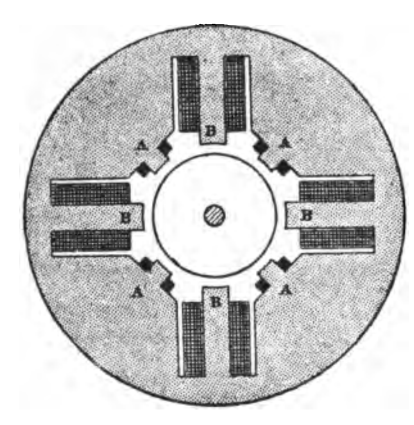


Фиг. 100.

Въ апрѣлѣ 1889 г. Тесла описываетъ способъ питанія двухфазныхъ двигателей обыкновеннымъ (однофазнымъ) токомъ, пользуясь для пусканія въ ходъ синхроннаго двигателя особымъ приспособленіемъ, *сдвигающимъ фазы.* Оно состоитъ въ томъ, что обѣ серіи обмотокъ соединяются параллельно, причемъ въ одну вѣтвь включаютъ сопротивленіе безъ самоиндукціи (фиг. 100), въ другую же, наоборотъ, сопротивленіе съ большой самоиндукціей. Разъ двигатель пришелъ въ движеніе, это приспособле-

ніе выключаютъ, но двигатель продолжаетъ дальше работать, дакъ обыкновенный синхронный. Тесла не просилъ патента на это приспособленіе вообще, такъ какъ имъ уже раньше пользовался Феррарисъ (стр. 89), но онъ требовалъ патентъ на него, какъ на способъ пусканія въ ходъ синхронныхъ двигателей. Вотъ его слова: «Я думаю, что я первый началъ питать электромагнитные двигатели перемѣнными токами... производя при помощи перемѣнныхъ токовъ непрерывное вращеніе ихъ полюсовъ или точекъ наиболѣе сильнаго магнитнаго притяженія до тѣхъ поръ, пока двигатели не достигнутъ требуемой скорости и затѣмъ, при помощи тѣхъ же токовъ, производя простое перемагничиваніе его полюсовъ, другими словами, мѣняя соединенія цѣпей въ двигателѣ такъ, что двигатель, работающій на основаніи одного принципа, начинаетъ работать, для требуемой цѣли, на основаніи другаго». Тутъ, повидимому, говорится только о синхронномъ двигателѣ.

Фиг. 101.

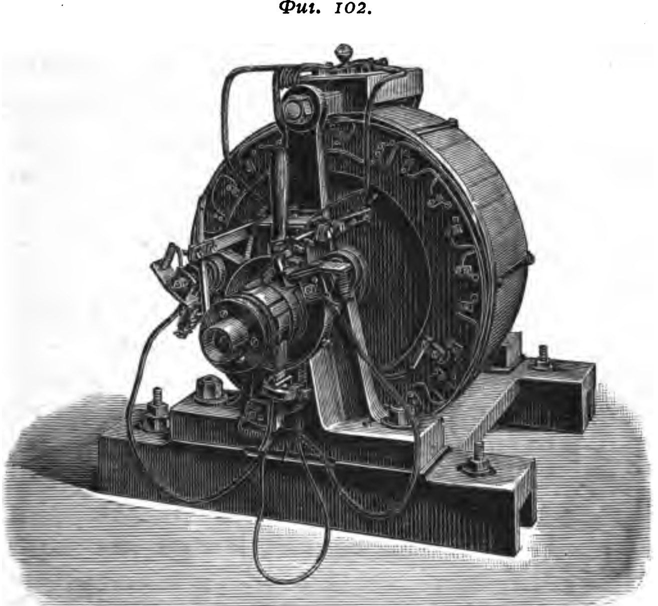


Двигатель со сдвигомъ фазъ.

За этимъ патентомъ послѣдовали другіе на разнаго рода двигатели съ сдвинутыми фазами, въ томъ числѣ на двигатель, представленный на фиг. 101, въ которомъ двѣ серіи катушекъ включены параллельно въ проводъ съ обыкновеннымъ перемѣннымъ токомъ. Катушки одной серіи сдѣланы изъ толстой проволоки и снабжены длинными желѣзными сердечниками. Онѣ имѣютъ малое сопротивленіе и большой коэффиціентъ самоиндукціи. Другая серія катушекъ намотана на очень короткихъ сердечникахъ и состоитъ изъ проволоки съ очень большимъ сопротивленіемъ. Въ результатѣ токъ въ первой серіи катушекъ запаздываетъ относительно тока во второй и такимъ образомъ образуется вращеніе полярности. Много другихъ видовъ двигателей было изобрѣтено въ періодъ 1889—91

годовъ, когда серія ихъ закончилась шестиполюснымъ двигателемъ, въ которомъ требуемая разность фазъ получалась при помощи включенія въ одну серію катушекъ конденсаторовъ, заряжавшихся токами, проходившими по второй обмоткѣ. Весь рядъ этихъ важныхъ патентовъ поступилъ въ пользованіе компаніи Вестингауза. Для дальнѣйшаго ознакомленія съ работами Тесла, надо обратиться къ его лекціи 8 мая въ Американскомъ *Institute*

Фиг. 102.



Двигатель Газельвандера (1887).

of Electrical Engeneers, а также къ книгѣ Мартена объ изобрѣтеніяхъ Тесла.

Двигатель Газельвандера. Лѣтомъ 1887 года Газельвандеръ, инженеръ въ Оффенбургѣ (Баденъ) построилъ трехфазную машину, приблизительно въ 10 силъ, имѣвшую неподвижную кольцевую арматуру въ 40 сант. въ діаметрѣ, снабженную 12 катушками, и внутренній вращающійся четырехполюсный индукторъ. Она была также снабжена коммутаторомъ для возбужде-

нія индуктора. Этотъ двигатель (фиг. 102) былъ выставленъ на Франкфуртской выставкѣ 1891 г. Основная идея Газельвандера была слѣдующая: Въ каждой обыкновенной динамомашинѣ и въ каждомъ двигателѣ постояннаго тока, въ дѣйствительности образуются въ различныхъ группахъ катушекъ перемѣнныя электродвижущія силы различныхъ фазъ. Коллекторъ и служитъ для того, чтобы преобразовывать эти многофазные токи въ рядъ налагающихся другъ на друга токовъ одного направленія. При передачѣ энергіи помощью постояннаго тока двѣ такія машины постояннаго тока соединяются между собою двумя проводами. Пульсирующій токъ постояннаго направленія, доставляемый одной машиной (генераторомъ) вновь разлагается на составныя части коллекторомъ второй машины (двигателя) и вновь преобразуется въ рядъ многофазныхъ перемѣнныхъ токовъ. Изобрѣтателю и пришла идея уничтожить эти двѣ одинаковыя, но обратныя операціи сложенія и коммутированія и затѣмъ коммутированія и разложенія многофазныхъ токовъ, образующихся въ отдѣльныхъ катушкахъ арматуры. Такимъ образомъ онъ пришелъ къ способу передачи энергіи многофазными токами, уничтоживъ коллекторы и щетки, т. е., примѣняя ихъ только постольку, поскольку они нужны для выпрямленія небольшой части тока, требуемаго для возбужденія индукторовъ. Группировка катушекъ въ двигателѣ была звѣздообразная, и катушки были снабжены зажимами, которые позволяли соединять катушки каждой изъ трехъ группъ между собою послѣдовательно или параллельно. Каждая изъ 12 катушекъ состояла изъ 52 оборотовъ проволоки въ 1,52 милл. При 960 оборотахъ въ минуту можно было получать отъ этой машины токъ каждой фазы въ 24 ампера при 100 вольтахъ. Эта машина описана Эпштейномъ въ «*Elektrotechnische Anzeiger*» за 1891 г. *).

Двигатель Вильсона. Въ своемъ патентѣ (№ 18525, 1888 г.) Вильсонъ описываетъ двухфазный двигатель съ арматурой кольцеваго или барабаннаго типа, снабженный коммутаторомъ. Двух-

*) См. также оффиціальный отчетъ о франкфуртской выставкѣ, (изданный въ 1893 г.) стр. 251 «*Elektr. Zeit.*», 1891 г., стр. 540 и 609.

фазные токи доставляются и въ арматуру и въ индукторы, причемъ направленіе вращенія опредѣляется положеніемъ щетокъ.

Двигатель Венштрёма. Венштремъ взялъ въ 1890 году Англійскій патентъ (№ 5423, 1890) на особую трехфазную систему. Онъ описываетъ и даетъ замѣчательно ясную діаграмму обмотки трехфазнаго гонератора. Венщтремъ предлагалъ соединять три обмотки звѣздой. Въ патентѣ содержится также описаніе трехфазнаго трансфарматора и трехфазнаго двигателя.

Изслѣдованія Доливо-Добровольскаго. Г. Доливо-Добровольскій состоитъ однимъ изъ главныхъ инженеровъ Берлинской *Allgemeine Electricitäts - Gesellschaft.* Ему мы обязаны терминомъ «*Drehstrom*» (примѣненнымъ сначала къ трехфазной системѣ) для обозначенія системъ токовъ многофазныхъ.

Первый англійскій патентъ Добровольскаго (№ 10933, 1889) относится къ устройству роторовъ многофазныхъ машинъ, касается главнымъ образомъ полученія вращающихся полей, дѣйствующихъ на проводники, помѣщенные въ немъ черезъ посредство образующихся въ проводникахъ паразитныхъ токовъ. Онъ предлагалъ употреблять въ качествѣ ротора желѣзную массу, на которой укрѣпленъ рядъ мѣдныхъ проводниковъ, полосъ или жилъ, помѣщенныхъ такъ, чтобы они были одновременно перпендикулярны и къ силовымъ линіямъ поля и къ направленію вращенія. Всѣ эти проводники и жилы, на концахъ замыкаются на себя. Приложенные къ патенту рисунки иллюстрируютъ простѣйшія формы такихъ роторовъ (включая сюда и «бѣличье колесо») съ массивными желѣзными частями.

Слѣдующіе два патента (№№ 19554 и 19555, 1889) относятся къ особой формѣ трехфазнаго генератора и трехфазнаго трансформатора. Послѣдній имѣетъ сердечникъ съ тремя вѣтвями, причемъ магнитныя цѣпи соединены звѣздой.

Въ августѣ 1890 г. является патентъ № 13260, трактующій о соединеніи общихъ точекъ трехфазной (или *n*-фазной) системы, общимъ возвратнымъ проводомъ съ цѣлью сдѣлать три (или болѣе) цѣпи независимыми другъ отъ друга, и о приборахъ для регулированія напряженія въ каждой изъ цѣпей. Тутъ

описаны два трехфазныхъ авто-трансформатора, одинъ изъ которыхъ для работы на дальнія разстоянія, и комбинація изъ трехъ отдѣльныхъ трансформаторовъ.

Въ патентѣ № 20425, за 1890 г. описанъ пластинчатый роторъ, снабженный изолированными катушками. Здѣсь, показавъ, какъ при пусканіи въ ходъ реакція ротора интерферируетъ съ полемъ, произведеннымъ первичными токами и уменьшаетъ моментъ вращенія, авторъ предлагаетъ способъ введенія въ цѣпь ротора регулировочныхъ сопротивленій. На чертежахъ изображены жидкіе реостаты.

Въ патентѣ № 3191 за 1891 г. Добровольскій описываетъ многофазные трансформаторы для преобразованія системы токовъ, сколькихъ угодно фазъ, въ систему трехфазныхъ токовъ, а также и для обратной цѣли. Въ патентѣ за № 13503 за тотъ же годъ онъ описываетъ свой способъ полученія токовъ промежуточныхъ фазъ при помощи комбинаціи системъ соединенія звѣздой и многоугольникомъ. Такъ, онъ показываетъ, какъ можно получить шестифазный токъ въ трехфазной системѣ при трехъ линіяхъ помощью шести катушекъ, соединивъ три изъ нихъ послѣдовательно съ тремя линіями и включивъ три остальныя въ отвѣтвленія между этими линіями. Всѣ шесть катушекъ должны быть расположены соотвѣтственнымъ образомъ на сердечникѣ индуктора. Введеніемъ такихъ токовъ съ промежуточными фазами Добровольскій предполагаетъ достичь большого постоянства момента вращенія (который при отсутствіи реакцій ротора будетъ колебаться при всякомъ полномъ періодѣ между нѣкоторыми максимальной и минимальной величинами). Различные способы этого комбинированія цѣпей и фазъ показаны на большомъ числѣ чертежей.

Многофазныя установки во Франкфуртѣ на Майнѣ въ 1891 г. Никакой очеркъ развитія примѣненій многофазныхъ токовъ не былъ бы сколько-нибудь полонъ, если бы въ немъ не было упомянуто объ электротехнической выставкѣ, бывшей во Франкфуртѣ на Майнѣ лѣтомъ 1891 года. Хотя эта выставка и называлась международной, но на самомъ дѣлѣ главными экспонентами были германскія фирмы и наибольшій интересъ представляли приборы для многофазныхъ токовъ, выставленные мно-

гими изъ этихъ фирмъ. Оффиціальный отчетъ *) содержитъ описаніе многихъ изъ нихъ вмѣстѣ съ результатами испытаній, производившихся въ теченіе нѣсколькихъ мѣсяцевъ экспертами. Помѣщенныя ниже данныя заимствованы изъ этого отчета.

Фирма Ламейеръ и К° (Франкфуртъ) давала со своей образцовой центральной станціи, помѣщавшейся въ машинномъ зданіи, трехфазный токъ въ 75 вольтъ, который приводилъ въ движеніе нѣсколько трехфазныхъ двигателей, въ томъ числѣ историческій двигатель Газельвандера (изображенный на фиг. 102), десятисильный синхронный четырехполюсный двигатель обыкновеннаго Ламейеровскаго типа, въ которомъ только коллекторъ былъ замѣненъ тремя контактными кольцами, и нѣсколько другихъ мелкихъ двигателей.

Фирма Шуккертъ и К° выставила два большихъ двухфазныхъ генератора съ арматурами обычнаго Шуккертовскаго типа (плоскія кольца), снабженными контактными кольцами. Одна изъ этихъ машинъ помѣщалась въ машинномъ зданіи и доставляла энергію для водоподъемной станціи на Майнѣ, другая, установленная приблизительно на два километра дальше въ *Palm-Garten'*ѣ, доставляла энергію на выставку. Такъ какъ кольцевыя обмотки арматуръ этихъ машинъ были соединены многоугольникомъ (фиг. 52,), то необходимо было примѣнить двѣ отдѣльныя цѣпи съ четырьмя проводами. Однако, установивъ трансформаторы (см. фиг. 155), получилась возможность примѣнить для передачи на разстояніе систему только изъ трехъ проводовъ. Въ качествѣ двигателей употреблялись подобныя же машины съ индукторами, возбуждаемыми постояннымъ токомъ. Онѣ вращались синхронично съ генераторами и доставляли бо́льшую работу, чѣмъ та, которую онѣ доставили бы, если бы ихъ заставить работать, какъ асинхронные двигатели, безъ посторонняго возбужденія. Двигатель въ 25 силъ, работавшій на выставкѣ, имѣлъ вспомогательный коммутаторъ, который позволялъ двигателю быть самовозбуждающимся. Пятидесяти-сильный двигатель на водоподъемной станціи былъ съ постороннимъ возбужденіемъ. Употреблявшіяся

*) *Allgemeiner Bericht über die Internationale Electrotechnische Ausstellung in Frankfurt am Main 1891,* 2 Vol. изданы во Франкфуртѣ въ 1893 г.

трансформаторы имѣли тоже форму плоскаго кольца. Обмотки помѣщались въ выемкахъ, сдѣланныхъ въ сердечникѣ, приготовленномъ изъ желѣзной ленты, свернутой въ замкнутую спираль.

Фирма Сименсъ и Гальске выставила нѣсколько типовъ небольшихъ трехфазныхъ двигателей, изъ которыхъ одинъ типъ имѣлъ замкнутый на себя роторъ, другой типъ былъ съ роторомъ, снабженнымъ коммутаторомъ, въ который черезъ посредство трехъ равноотстоящихъ щетокъ шелъ трехфазный токъ, пройдя предварительно черезъ обмотки статора. Эта фирма выставила также два трехфазныхъ генератора. Одинъ изъ нихъ походилъ на извѣстный альтернаторъ той же фирмы и имѣлъ арматуру, состоящую изъ 24 катушекъ, раздѣленныхъ на три группы, по 8 въ каждой, и вращающуюся между двумя вѣнцами съ 16 полюсами. Другой генераторъ былъ типа обыкновенныхъ машинъ постояннаго тока фирмы Сименсъ. Барабанная арматура была только соединена въ трехъ равноотстоящихъ точкахъ съ тремя контактными кольцами.

Берлинская *Allgemeine Electricitäts Gesellschaft* вмѣстѣ съ Цюрихской фирмой *Oërlikon*, устроила замѣчательную передачу энергіи на дальнее разстояніе (между Лауффеномъ и Франкфуртомъ) помощью токовъ высокаго напряженія, которая подробно описана ниже. Это была трехфазная система (такъ называемая система *Drehstrom*). Стосильный двигатель, установленный на выставкѣ и получавшій токъ изъ Лауффена, отстоящаго отъ выставки на 170 километровъ, качалъ воду для питанья искусственнаго водопада. Этотъ двигатель представленъ на фиг. 104.

Трехфазный двигатель меньшихъ размѣровъ (въ три силы приблизительно), вращавшій небольшую динамо-машину постояннаго тока, питавшую рядъ лампъ, имѣлъ устройство обратное тому, которое имѣютъ современные индукціонные двигатели. Токи доставлялись при помощи трехъ контактныхъ колецъ во вращающуюся арматуру, индукторомъ же служило неподвижное желѣзное кольцо, снабженное замкнутой на себя обмоткой, въ которой индуктировался намагничивающій токъ. Двигатель еще меньшихъ размѣровъ съ индукціоннымъ роторомъ безъ всякихъ контактовъ вращалъ маленькій вентиляторъ. Другіе двигатели,

выставленные компаніей Эрликонъ и построенные по проэктамъ Броуна, имѣли устройство, примѣняемое понынѣ, т. е. имѣли неподвижную внѣшнюю арматуру, сердечникъ которой былъ составленъ изъ желѣзныхъ колецъ, снабженныхъ отверстіями, въ которыхъ помѣщалась обмотка. Роторъ тоже состоялъ изъ кольцеваго сердечника съ отверстіями для обмотки, состоявшей просто изъ мѣдныхъ прутьевъ, соединенныхъ между собою на основаніяхъ цилиндра двумя кольцами, такъ что весь роторъ имѣлъ видъ бѣличьяго колеса. Одинъ изъ этихъ двигателей, доставлявшій 20 силъ при 1200 оборотахъ въ минуту, вѣсилъ всего 420 килограммовъ.

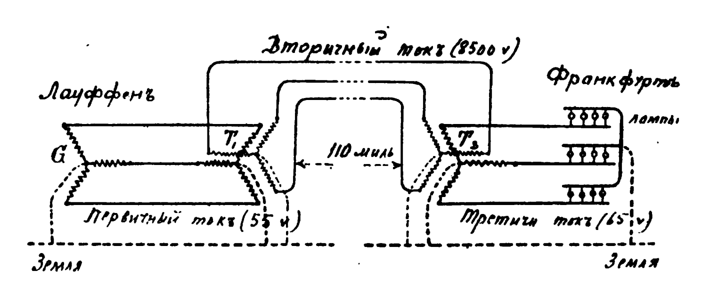
Лауффенъ-Франкфуртская передача.

Въ Лауффенѣ близъ Гейльборна рѣка Неккаръ образуетъ водопадъ съ паденіемъ приблизительно въ 3,5 метра. Энергіей этого водопада раньше частью пользовались для цементнаго завода, именно изъ 1500 силъ, которыми можно было располагать, утилитировались посредствомъ тюрбинъ 1200,—остававшимися 200 или 300 силъ предполагалось воспользоваться для освѣщенія города Гейльборна, находящагося отъ водопада на разстояніи около 10 километровъ. Когда этотъ проэктъ разсматривался (осенью 1890 г.), явилась мысль воспользоваться удобнымъ случаемъ, чтобы показать на Франкфуртской выставкѣ, чего можно достичь передачей энергіи на большія разстоянія, примѣняя высокія напряженія и въ то же самое время показать и преимущества многофазной (*drehstrom*) системы. Лауффенъ, какъ было сказано, находится на разстояніи 175 километровъ отъ Франкфурта. Для того, чтобы передать, какъ этого желали, 100 силъ по тремъ мѣднымъ проволокамъ, каждая толщиной только въ 4 мил., и при томъ съ отдачей не менѣе 75%, требовалось напряженіе не ниже 8000 вольтъ. Этотъ *tour de force* былъ тѣмъ не менѣе выполненъ. Инженеромъ, завѣдующимъ линіей и Лауффенской генераторной станціей былъ Мюнхенскій инженеръ Оскаръ фонъ-Миллеръ. Съ нимъ работали двѣ большія фирмы: Берлинская *Allgemeine Electricitäts Gesellschaft* и Цюрихская *Oërlikon Machinenbau C^o^.* Имъ много помогало Германское Императорское Почтовое Упра-

вленіе въ трудной задачѣ прокладки проводовъ и вообще устройства линіи [1]).

Мѣдная проволока была доставлена одной фирмой изъ Гедергейма. Два генератора, построенные по проэкту Броуна фирмой Эрликонъ, были описаны въ гл. I. Каждый изъ нихъ могъ доставлять 1400 амперъ при 55 вольтахъ, причемъ частота тока равняется 40 періодамъ въ секунду. На каждомъ концѣ линіи были установлены трехфазные трансформаторы: въ Лауффенѣ для повышенія напряженія до 8500 вольтъ, во Франкфуртѣ для обратнаго пониженія его до 65 вольтъ. Эти трансформаторы (часть которыхъ была построена въ Берлинѣ, часть въ Эрликонѣ), были погружены для лучшей изоляціи въ масло. Внѣшняя ихъ форма напоминала форму трансформаторовъ въ Гошфельденѣ, изображенныхъ на фиг. 44. Обѣ обмотки, какъ низкаго, такъ и высокаго напряженія, были соединены звѣздой, причемъ общая точка всегда присоединялась къ землѣ. На фиг. 103

Фиг. 103.

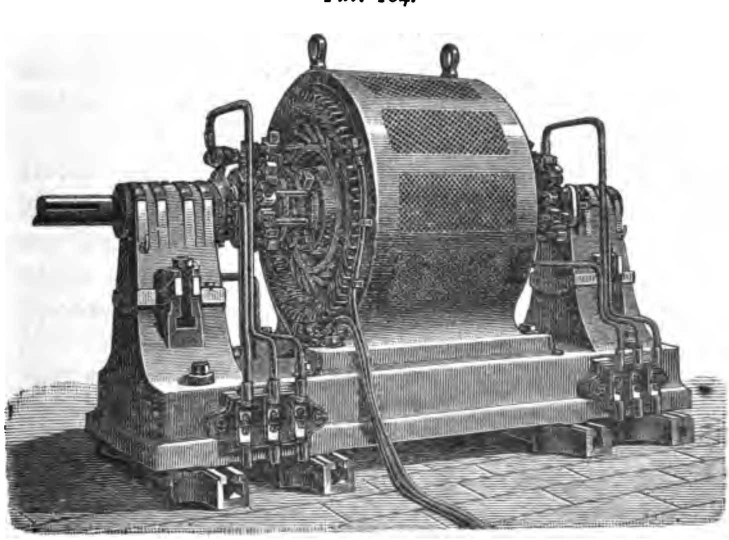


представлена схема соединеній понятная безъ объясненій. Линейные провода были подвѣшены на 3000 столбовъ, высотою въ 7,5 метра, причемъ на каждомъ столбѣ укрѣплено было по три изолятора съ внутреннимъ каналомъ для масла. Линія пересѣкала территорію четырехъ государствъ: Виртемберга, Бадена, Гессена и Пруссіи, слѣдуя преимущественно вдоль по линіи

[1]) Карта пути, а также подробное описаніе машинъ линіи и опытовъ, сдѣланныхъ экспертной комиссіей подъ предсѣдательствомъ проф. Вебера (изъ Цюриха), помѣщена въ оффиц. отчетѣ о Франкф. выставкѣ.

Неккарской жел. дороги, но минуя длинный тунель сквозь Оденваль въ Крельбергѣ, гдѣ линія проходила по горѣ. Вѣсъ всѣхъ проводовъ въ линіи равнялся приблизительно шестидесяти тоннамъ. Линія была построена подъ наблюденіемъ Эберта, телеграфнаго инспектора Императорскихъ Телеграфовъ, при содѣйствіи Виртембергскаго Королевскаго Почтово-Телеграфнаго управленія. Главный Начальникъ Телеграфовъ Германской Имперіи Др. фонъ-Стефанъ принялъ горячее участіе въ этомъ дѣлѣ и его благополучному окончанію много способствовало могущественное вліяніе д-ра Стефана. Августа 24, 1891 года линія была сдана офиціальными лицами компаніямъ Эрликонъ и Allgemeine и на слѣдующій же день на Франкфуртской Выставкѣ лампы свѣтились насчетъ энергіи, доставлявшейся изъ Лауффена. На выставкѣ былъ установленъ 100 сильный трехфазный двигатель (фиг. 104), спроэктированный Доливо-Добровольскимъ и по-

Фиг. 104.



строенный *Allgemeine Gesellschaft* и нѣсколько другихъ меньшихъ двигателей, о которыхъ говорилось выше. Большой двигатель приводилъ во вращеніе центробѣжный насосъ приблизительно въ 60 силъ, качавшій воду для искусственнаго водопада на вы-

соту приблизительно 10 метровъ надъ уровнемъ выставки. Кромѣ двигатель передаваемый токъ питалъ еще около 1000 лампъ накаливанія.

Къ идеѣ передачи энергіи при столь высокомъ напраженіи на такое большое разстояніе и притомъ многофазными токами отнеслись сначала съ большимъ скептицизмомъ. Говорили, что отдача передачи будетъ значительно уменьшена вслѣдствіе явленій, которыя вызоветъ емкость линіи, утечка съ 10000 изоляторовъ, на которыхъ подвѣшены провода и т. д. Даже лица близко стоявшія къ дѣлу выражали опасенія, чтобы отдача не была меньше 50% и одно время думали, что эксперты не будутъ допущены къ производству полнаго испытанія, Однако испытанія показали, что всѣ эти страхи были преждевременны. Подробныя испытанія, произведенныя экспертной комиссіей въ осенніе мѣсяцы, при напряженіи свыше 8000 вольтъ, показали, что количество электрической энергіи, получавшееся во Франкфуртѣ, въ среднемъ равнялось 74% энергіи, доставлявшейся Лауффенскими тюрбинами генераторамъ. Различные источники потерь были точно опредѣлены и потери тщательно измѣрены. Результаты этихъ измѣненій помѣщены въ отчетѣ пр. Вебера. Этотъ отчетъ заключаетъ слѣдующіе выводы:

1. Въ Лауффенъ-Франкфуртской установкѣ для электрической передачи энергіи на разстояніи 170 километровъ при помощи системы перемѣнныхъ токовъ въ 8500—7500 вольтъ, проведенной по сплошнымъ мѣднымъ проводамъ, изолированнымъ масломъ и фарфоромъ, наименьшее количество энергіи въ четвертой [1]) цѣпи во Франкфуртѣ равнялось 68,5% и наибольшее 75,2% количества энергіи, доставлявшейся тюрбинами въ Лауффенѣ.

2. Въ этой установкѣ для передачи на большое разстояніе единственная причина потерь, которую можно было измѣрить, зависѣла отъ сопротивленія проводовъ (явленія Джоуля).

3. Теоретическія соображенія показали, что вліяніе емкости длинной воздушной линіи изъ сплошныхъ проводниковъ въ установкѣ для передачи энергіи перемѣнными токами при существовавшихъ условіяхъ и при частотѣ въ 30—40 періодовъ въ се-

---

[1]) Т.-е. въ распредѣл. въ цѣпи Франкфуртскихъ трансформаторовъ.

Пр. Пер.



кунду, столь ничтожно, что его вовсе не слѣдуетъ принимать во вниманіе при проэктированіи подобныхъ электрическихъ передачъ.

4. Какъ результатъ нашихъ наблюденій при испытаніяхъ, имѣвшихъ цѣлью опредѣлить отдачу Лауффенъ-Франкфуртской передачи энергіи, мы добавляемъ слѣдующій четвертый выводъ: Работа съ перемѣнными электрическими токами въ 7500—8500 вольтъ, проходящими разстояніе больше 170 километровъ по проводамъ, изолированнымъ воздухомъ, фарфоромъ и масломъ, происходитъ съ такой же регулярностью, безопасностью и отсутствіемъ всякихъ случайностей, какъ и работа съ перемѣнными токами въ нѣсколько сотенъ вольтъ на разстояніе нѣсколькихъ метровъ.

При дальнѣйшихъ изслѣдованіяхъ, произведенныхъ позже Др. Киттлеромъ и Линдлеемъ [1]), пользовались весьма высокими напряженіями, превосходившими въ нѣкоторыхъ случаяхъ 28000 вольтъ. Эти напряженія получались посредствомъ послѣдовательнаго соединенія на концахъ линіи двухъ трансформаторовъ. Въ общемъ результатъ получился слѣдующій:

Передача энергіи изъ Лауффена во Франкфуртъ, при напряженіи въ 25000 вольтъ (между проводами и 14000—15000 вольтъ между проводами и землей) и при частотѣ въ 24 періода въ секунду, имѣла отдачу въ 75% при нагрузкѣ въ 180 силъ.

Лауффенъ-Франкфуртская передача была больше, чѣмъ простой опытъ. Она была блестящая и смѣлая демонстрація не только полезности высокихъ напряженій при передачѣ энергіи, но и достоинствъ многофазныхъ токовъ. Какъ таковая, она составляетъ эпоху въ развитіи практическихъ примѣненій электричества. Эта передача вызвала интересъ къ дѣлу во всей Европѣ и особенно въ Германіи. Доказательствомъ этому можетъ служить то обстоятельство, что самъ Германскій Императоръ пожертвовалъ для этого предпріятія 10000 марокъ.

---

[1]) Оф. отчетъ, т. II, стр. 451.



ГЛАВА V.

Устройство многофазныхъ двигателей.

На многофазные двигатели смотрѣли до сихъ поръ, какъ на приборы, въ которыхъ вращающееся магнитное поле производило вращеніе подвижной металлической массы (вращеніе Араго).

Но съ такимъ же правомъ на нихъ можно смотрѣть, какъ на родъ вращающагося трансформатора, первичныя и вторичныя обмотки котораго помѣщены на желѣзномъ сердечникѣ. Этотъ послѣдній устроенъ такъ, что одна изъ двухъ обмотокъ можетъ вращаться.

Если разсматривать ту часть двигателя, черезъ которую пропускается многофазный токъ съ цѣлью получить вращающееся поле, какъ первичную или индуктирующую, то другая часть, все равно будетъ ли она вращающаяся или неподвижная, должна быть разсматриваема какъ вторичная или индуктируемая цѣпь.

Дѣйствительно, первичные токи индуктируютъ токи во вторичныхъ обмоткахъ, которые затѣмъ взаимодѣйствуютъ съ магнитнымъ полемъ, въ которомъ вторичныя обмотки находятся, вслѣдствіе чего эти послѣднія приходятъ въ движеніе. Если смотрѣть на двигатель такимъ образомъ, то становится очевиднымъ, что для полученія наилучшаго дѣйствія для индуктированныхъ токовъ, которые можно, если угодно, назвать паразитными, нужно имѣть пути т. е. нужно устроить проводники, помѣстивъ ихъ такъ, чтобы механическое дѣйствіе, ими испытываемое, было наибольшее. Если, напримѣръ, можно пропустить токъ по желанію черезъ одинъ изъ двухъ проводниковъ, одинъ

изъ которыхъ лежитъ въ слабомъ магнитномъ полѣ, гдѣ, слѣдовательно, механическое дѣйствіе, способствующее вращенію, будетъ мало, а другой находится въ положеніи, при которомъ въ моментъ когда сила тока будетъ наибольшая и поле будетъ сильное и слѣдовательно механическое дѣйствіе будетъ значительно способствовать вращенію, то очевидно выгоднѣе пропустить токъ именно по второму проводнику.

Далѣе, первичная или индуктирующая обмотка можетъ быть сдѣлана неподвижной, тогда какъ вторичная или индуктируемая цѣпь будетъ вращаться, или же, наоборотъ, можно устроить двигатель такимъ образомъ, чтобы вращаться могла первичная цѣпь, вторичная же оставалась неподвижной и только взаимодѣйствіемъ съ первичной заставляла эту послѣднюю вращаться. Первое изъ этихъ устройствъ имѣетъ значительное преимущество, потому что при немъ машины, вторичныя цѣпи которыхъ состоятъ, какъ въ большинствѣ многофазныхъ двигателей, (исключая самыхъ большихъ), изъ простой замкнутой на себя обмотки, не будутъ требовать ни коммутаторовъ, ни контактныхъ колецъ, ни скользящихъ контактовъ или гибкихъ соединеній, отчего ихъ механическое устройство значительно упростится. При второго рода устройствѣ требуются для проведенія тока во вращающуюся часть контактныя кольца и щетки, но зато сопротивленіе вторичной обмотки при этомъ можно по желанію мѣнять, что однако не представляетъ большого преимущества. Къ этому второму классу двигателей принадлежитъ маленькая трехфазная машина (фиг. 95), построенная въ 1887 г. компаніей *Helios* и одинъ изъ двухъ двигателей, построенныхъ *Allgemeine Gesellschaft* по проекту Доброволъскаго и выставленныхъ на франкфуртской выставкѣ 1891 г. Въ настоящее время устраивается весьма мало двигателей такого типа.

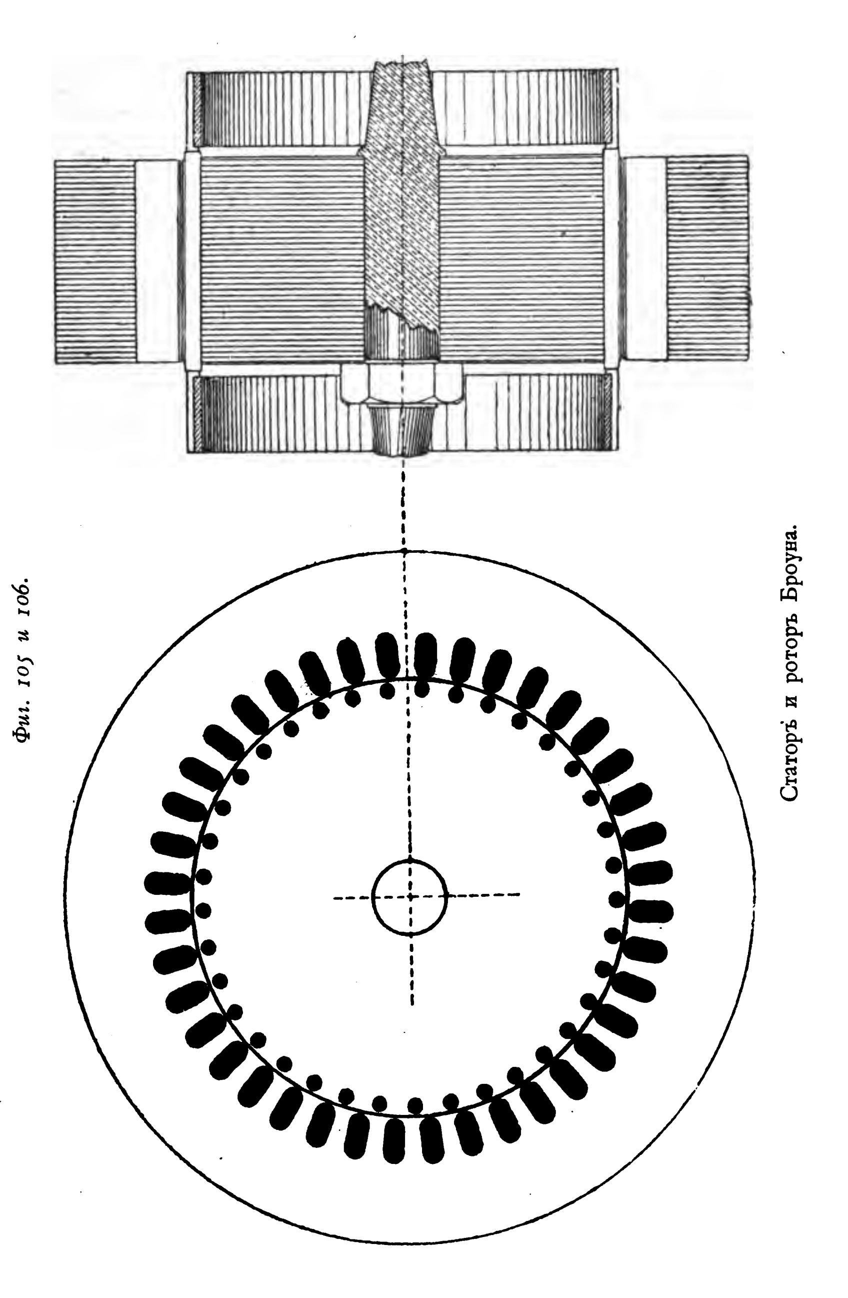
Въ машинахъ, въ которыхъ индукторъ неподвиженъ, магнитное поле вращается весьма быстро и подвижная часть вращается синхронично, или почти синхронично съ нимъ, такъ какъ магнетизмъ, возбужденный въ подвижной части, стремится сохранить относительно металлической массы неизмѣнное направленіе. Въ двигателяхъ втораго типа съ вращающимся индукторомъ, этотъ послѣдній самъ стремится двигаться въ направленіи про-

тивуположномъ направленію вращенія магнитнаго поля, создаваемаго имъ самимъ, и такимъ образомъ стремится сохранить во вторичной массѣ, его окружающей, магнетизмъ постояннаго направленія. Однако, магнетизмъ въ индуктируемой части сохраняетъ въ дѣйствительности постоянство направленія относительно индуктируемой металлической массы только тогда, когда ею въ дѣйствительности достигнутъ синхронизмъ. Во всѣхъ другихъ случаяхъ направленіе магнетизма медленно вращается относительно индуктируемыхъ массъ, причемъ частота его равняется разности частотъ тока и движенія.

Роторъ и статоръ. Изложенныя выше соображенія заставляютъ поднять вопросъ, которую изъ двухъ частей, индуктирующую или индуктируемую, слѣдуетъ по справедливости называть арматурой и которую индукторомъ. Въ обыкновенныхъ динамомашинахъ постояннаго и перемѣннаго тока, какъ мы знаемъ, этотъ вопросъ рѣшается не въ зависимости отъ того, которая изъ частей машины вращается и которая неподвижна, но въ зависимости отъ того, въ которой части магнетизмъ сохраняетъ свое направленіе относительно металлической массы. Въ индукторѣ каждой динамомашины и двигателя магнетизмъ имѣетъ постоянное направленіе. Въ арматурѣ же направленіе магнетизма относительно металлической массы мѣняется весьма быстро, въ то же время арматура двигателя и есть именно та часть, въ которую впускается токъ отъ линіи.

На основаніи этого мы бы должны разсматривать ту часть многофазнаго двигателя, въ которую входитъ токъ, какъ арматуру, тогда какъ другую часть, въ которой направленіе магнетизма почти неизмѣнно, какъ индукторъ. Это будетъ въ дѣйствительности индукторъ, не намагничиваемый ни какимъ-либо отдѣльнымъ токомъ, ни даже выпрямленный частью главнаго тока, а только развивающимися въ немъ паразитными токами.

Однако, такъ какъ рабочіе уже привыкли называть арматурой вращающуюся часть, то часто это названіе и получаетъ вращающаяся часть многофазныхъ двигателей. На самомъ же дѣлѣ въ большинствѣ многофазныхъ двигателей, напр., въ представленныхъ на черт. 167, 169 и 170, арматурой будетъ именно та часть, которая стоитъ неподвижно и окружаетъ вращающуюся часть.

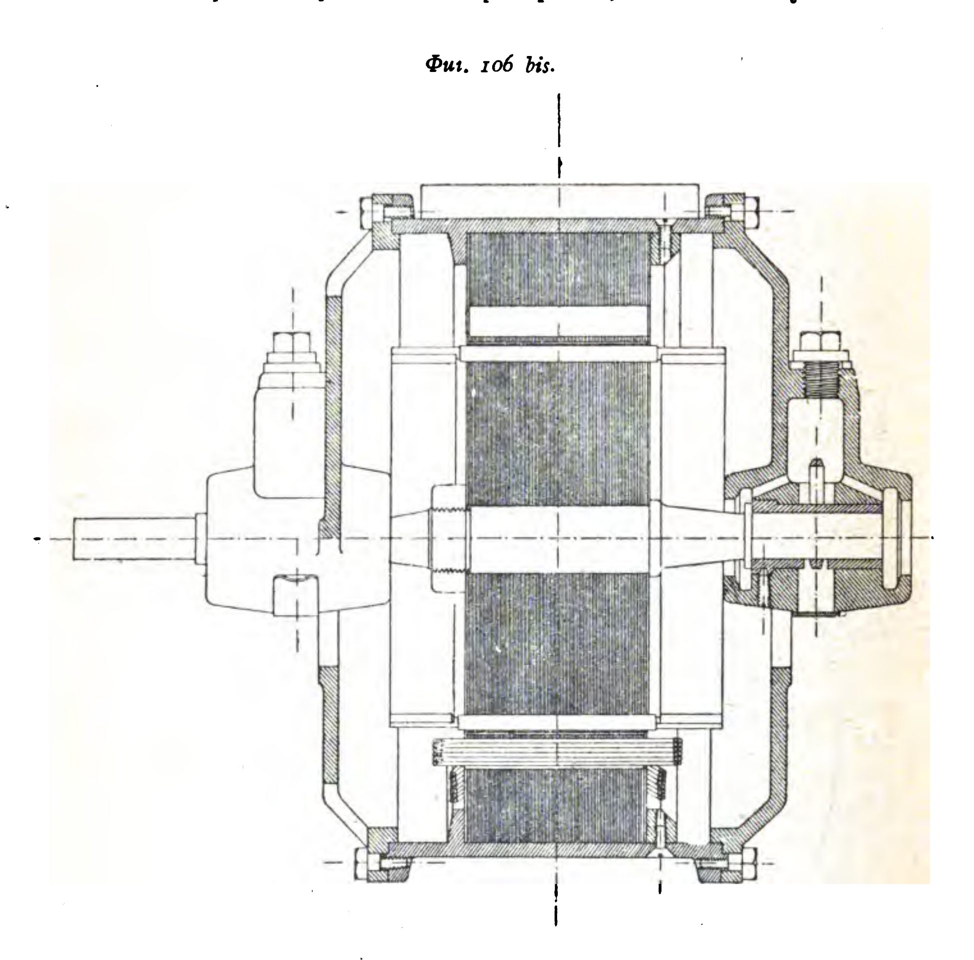


Фиг. 105 и 106.

Статоръ и роторъ Броуна.

Чтобы избѣжать всякаго смѣшенія этихъ понятій, мы будемъ въ дальнѣйшемъ избѣгать, при описаніи многофазныхъ двигателей, употребленія терминовъ «арматура» и «индукторъ» и будемъ называть вращающуюся часть «роторомъ», а неподвижную часть

Фиг. 106 bis.

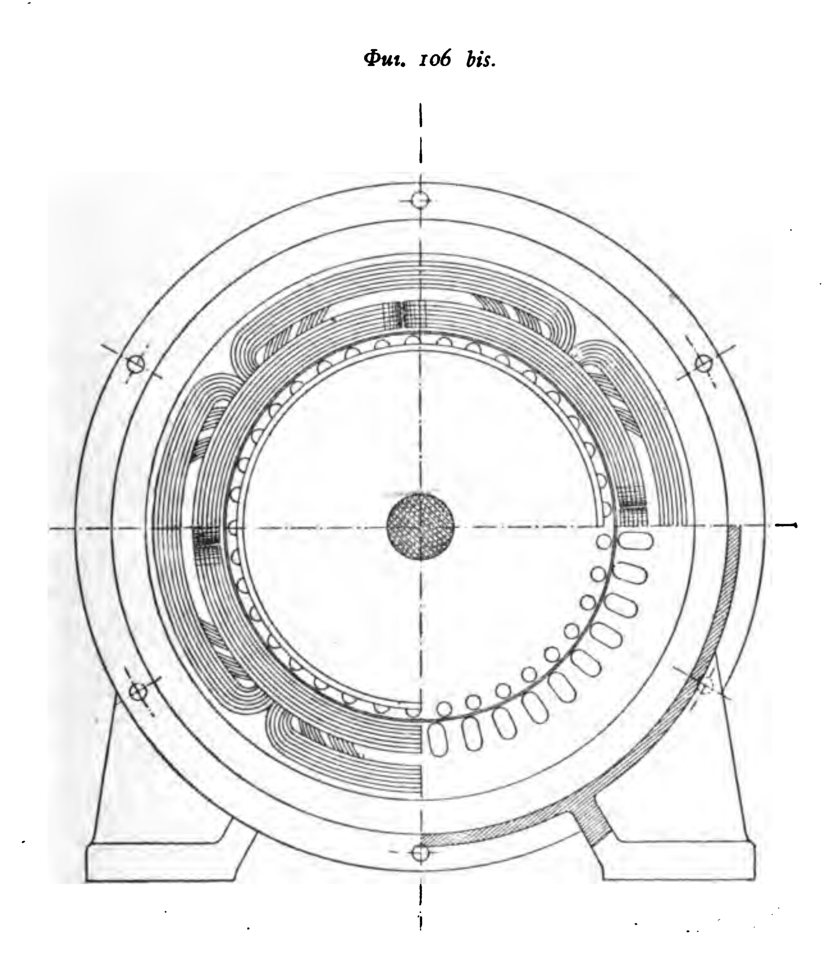


«статоромъ». Обмотка статора обыкновенно бываетъ первичной, обмотка ротора—вторичной.

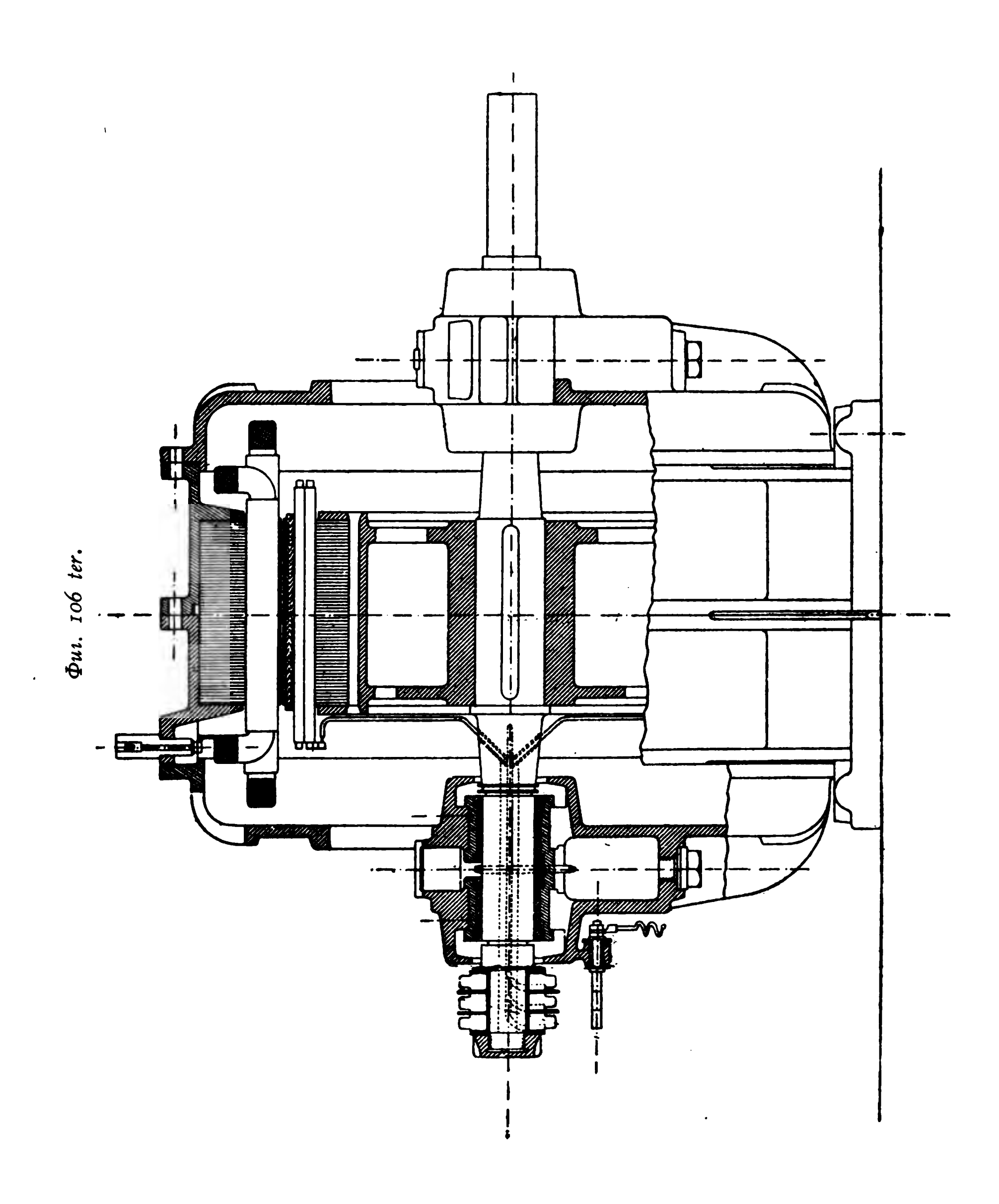
Какъ роторъ, такъ и статоръ обыкновенно состоятъ изъ желѣзныхъ сердечниковъ, составленныхъ изъ дисковъ, штампованныхъ изъ листового желѣза, снабженныхъ отверстіями для по-

мѣщенія обмотки. На фиг. 105 изображены такіе диски для четырехполюснаго шестисильнаго двухфазнаго двигателя, полный чертежъ котораго данъ на фиг. 106 bis. Слѣдуетъ замѣтить, что отверстія для обмотки сдѣланы весьма близко къ внѣшней пери-

Фиг. 106 bis.

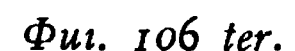


феріи ротора и къ внутренней периферіи статора, такъ чтобы послѣ обмотки, поверхъ обмотки оставался бы весьма тонкій слой желѣза, черезъ который могла бы происходить только весьма незначительная магнитная утечка. Другія формы показаны на



Фиг. 106 ter.

фиг. 36 и 106 ter. На фиг. 106 представленъ разрѣзъ двигателя, сдѣланный параллельно оси, на которомъ видно расположенiе штампованныхъ дисковъ. Съ каждой стороны сердечникъ



Фиг. 106 ter.

ротора заканчивается толстой металлической пластиной и, кромѣ того въ большихъ двигателяхъ черезъ весь сердечникъ на нѣкоторомъ разстоянiи отъ оси проходятъ для скрѣпленiя болты. Мѣдные стержни, составляющiе обмотку, помѣщены въ бумаж-

ныхъ трубкахъ и соединены между собою на основаніяхъ ротора широкой мѣдной лентой, имѣющей значительную поверхность охлажденія.

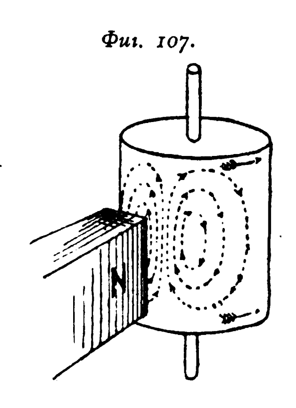
Изъ того что было сказано раньше о синхронизмѣ, не слѣдуетъ заключать, что число оборотовъ ротора стремится стать равнымъ частотѣ (числу періодовъ) тока. Это будетъ такъ только въ случаѣ двухполюснаго поля. Но большинство многофазныхъ двигателей многополюсные, и скорость вращенія уменьшается обратно пропорціонально числу паръ полюсовъ въ вращающемся полѣ. Если, напримѣръ, черезъ двигатель, снабженный такой обмоткой, что его статоръ производитъ поле съ шестью перемѣнными полюсами, т. е. съ тремя парами полюсовъ, пропускать токъ въ 60 періодовъ въ секунду, то полярность будетъ мѣняться въ теченіе $^1/_{60}$ секунды на протяженіи $^1/_2$ окружности, слѣдовательно шестиполюсное поле будетъ совершать только 20 оборотовъ въ секунду. Эту-то скорость и будетъ сремиться пріобрѣсти роторъ. Такимъ образомъ преимущество многополюсныхъ двигателей состоитъ въ томъ, что въ нихъ достигается и малая скорость безъ помощи какихъ-либо передачъ.

Устройство ротора. Въ началѣ этой главы было замѣчено, что для лучшаго механическаго дѣйствія, токи, индуктируемые въ роторѣ, должны проходить по путямъ, расположеннымъ такъ, чтобы они способствовали образованію наибольшаго движущаго усилія.

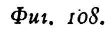
Разсмотримъ самый элементарный случай,—именно случай, когда мѣдный цилиндръ помѣщенъ во вращающемся полѣ, какъ это дѣлалось въ первыхъ двигателяхъ Феррариса (фиг. 92). Дѣйствіе такого поля будетъ совершенно подобно дѣйствію двухъ магнитныхъ полюсовъ, помѣщенныхъ съ противуположныхъ сторонъ цилиндра и вращающихся вокругъ него. Предположимъ, что сѣверный полюсъ находится передъ цилиндромъ (фиг. 107) и перемѣщается справа налѣво (т. е. обратно часовой стрѣлкѣ, если смотрѣть сверху). Индуктивное дѣйствіе будетъ то же, какъ въ случаѣ, если бы полюсъ оставался неподвиженъ, а цилиндръ вращался слѣва направо. Такое вращеніе (на основаніи принципа, высказаннаго на стр. 5) вызоветъ образованіе въ части, проходящей подъ полюсомъ въ направле-

ніи, указанномъ стрѣлками, электродвижущихъ силъ, направленныхъ вверхъ, результатомъ чего будетъ образованіе двухъ серій паразитныхъ токовъ, изображенныхъ на чертежѣ. Далѣе, механическая сила, которую испытываетъ проводникъ съ токомъ, помѣщенный въ магнитное поле, всегда направлена подъ прямымъ угломъ, какъ къ магнитнымъ линіямъ поля, такъ и къ току. Вслѣдствіе этого тѣ части мѣди, по которымъ токъ идетъ вверхъ, перпендикулярно къ линіямъ поля, будутъ испытывать боковое давленіе, направленное влѣво; тѣ части мѣди, по которымъ токи будутъ проходить горизонтально, будетъ только стремиться подняться или опуститься и не будутъ вліять на величину вращающаго усилія. Наконецъ, тѣ части, въ которыхъ токи идутъ сверху внизъ, будутъ, если онѣ лежатъ въ томъ же магнитномъ полѣ, стремиться повернуться въ обратномъ направленіи. Отсюда ясно, что можно получить лучшіе результаты, если идущіе внизъ токи заставить проходить черезъ поля, направленныя обратномъ тому, въ которомъ они шли вверхъ. Въ этомъ случаѣ всѣ усилія будутъ стремиться произвести вращеніе въ одну и ту же сторону и моментъ вращенія удвоится.

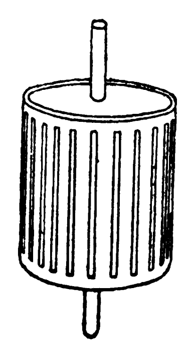
Фиг. 107.



Какъ первый шагъ къ такому усовершенствованію, можно разсматривать приспособленіе, состоящее въ томъ, что въ цилиндрѣ вырѣзывается вдоль по образующимъ рядъ параллельныхъ желобковъ, идущихъ почти до основаній (фиг. 108), или въ томъ, что цилиндръ составляется изъ ряда параллельныхъ полосъ, соединенныхъ на основаніяхъ цилиндра кольцами. Доброво льскій, первый предложившій послѣднее устройство подъ именемъ *Schluss-anker*, повидимому думалъ, что изоляція этихъ полосъ отъ желѣзнаго сердечника не имѣетъ

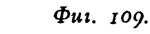


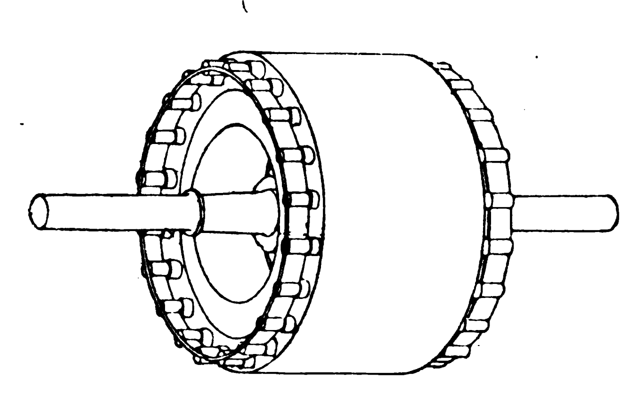
Фиг. 108.



особаго значенія. Онъ смотрѣлъ на эти полосы, какъ на мѣдныя жилы, помѣщенныя въ массивномъ желѣзномъ тѣлѣ.

Придача цилиндру желѣзнаго сердечника несомнѣнно есть большое усовершенствованіе сравнительно съ употребленіемъ пустотѣлаго или сплошнаго мѣднаго цилиндра, такъ какъ этотъ сердечникъ улучшаетъ магнитную цѣпь и увеличиваетъ напряженіе магнитнаго поля, производя такимъ образомъ усиленіе не только индуктивнаго дѣйствія статора, но и механическихъ дѣйствій токовъ, создающихъ вращающее усиліе. Сплошной желѣзный цилиндръ можетъ, очевидно, служить роторомъ и съ магнитной точки зрѣнія онъ будетъ превосходенъ, но высокое удѣльное сопротивленіе желѣза мѣшаетъ образованію достаточно сильныхъ токовъ. Поэтому значительно лучше снабжать массивный желѣзный цилиндръ или мѣдной оболочкой, или окружать его рядомъ мѣдныхъ прутьевъ, образующихъ родъ бѣличьяго колеса, или же, наконецъ, помѣщать рядъ мѣдныхъ прутьевъ въ отверстія, просверленныя вблизи периферіи цилиндра, соединяя ихъ между собою на основаніяхъ цилиндра кольцами (какъ на фиг. 109). Далѣе, такъ какъ всѣ паразитные


Фиг. 109.



Современный замкнутый на себя роторъ.

токи, циркулирующіе въ цилиндрѣ (подобные показаннымъ на фиг. 107), будучи гораздо менѣе полезными въ смыслѣ механи-

ческаго дѣйствія, чѣмъ токи, проходящіе по соотвѣтственно выбраннымъ путямъ, все-таки поглощаютъ нѣкоторое количество энергіи, превращая ее въ тепло, то значительно лучше принять какъ это нашелъ Броунъ, нѣсколько иную конструкцію сердечника ротора, именно устраивать его изъ отдѣльныхъ дисковъ или колецъ, приготовленныхъ изъ мягкаго желѣза, изолируя ихъ (слегка) другъ отъ друга и отъ мѣдныхъ стержней (тщательно), образующихъ проводящую обмотку. Такимъ образомъ мы придемъ къ формѣ ротора, представленной на фиг. 109, который такъ часто употреблялся для маленькихъ и даже для большихъ двигателей. Это роторъ, въ которомъ *бѣличье колесо* изъ мѣдныхъ прутьевъ вдѣлано въ пластинчатый желѣзный сердечникъ и замкнуто на основаніяхъ мѣдными или иногда (нейзильберовыми) кольцами.

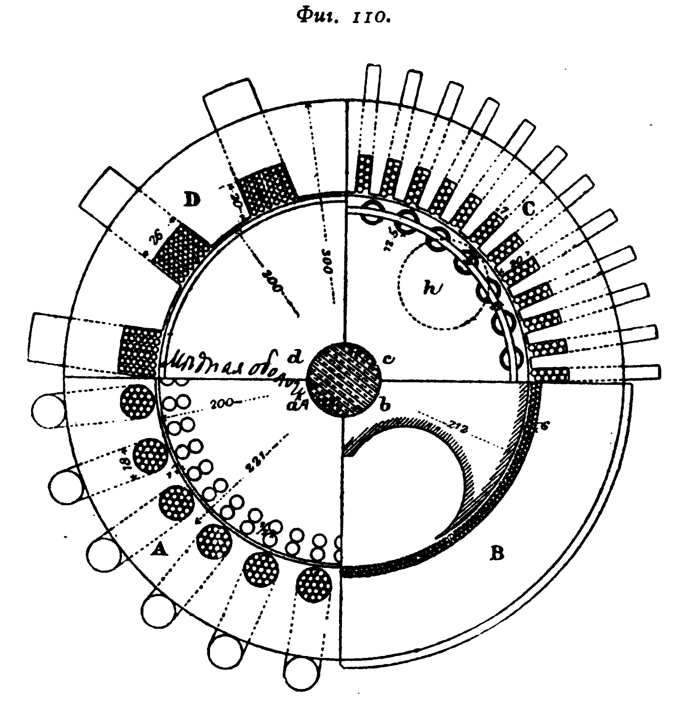
Однако до такой простой формы ротора дошли только послѣ многихъ опытовъ. Многія, до сихъ поръ не опубликованныя изслѣдованія Броуна, произведенныя въ началѣ 1890 г., представляютъ въ этомъ отношеніи громадный интересъ. Броунъ взялъ рядъ колецъ совершенно одинаковаго внутренняго діаметра, обмотанныхъ различнымъ образомъ, но такъ, что всѣ они почти одинаковымъ образомъ возбуждались помощью трехфазныхъ токовъ. Кромѣ того, онъ взялъ опять-таки нѣсколько роторовъ, всѣ въ 199 сант. внѣшняго діаметра, которые могли вращаться въ любомъ изъ колецъ. Такимъ образомъ, онъ получилъ возможность испробовать значительное число комбинацій, измѣрить моменты вращенія ихъ при различныхъ скоростяхъ и измѣрить ихъ работоспособности. На фиг. 110, представляющей изъ себя копію съ рисунка, которымъ пользовались для постройки этихъ приборовъ на заводѣ Эрликонъ, показано устройство четырехъ колецъ и четырехъ роторовъ. Эти четыре кольца были слѣдующія:

A. Кольцо съ отверстіями, снабженное 24 каналами, въ 18 мил. въ діаметрѣ каждый, черезъ которые проходило по 21 проволокѣ. *B. Гладкое кольцо* или обыкновенный кольцевой сердечникъ, сплошь покрытый обмоткой, намотанной въ два слоя и раздѣленной на 24 группы катушекъ по 19 оборотовъ въ каждой катушкѣ. *C. Кольцо съ узкими зубцами*, имѣющее 48 зуб-

цовъ съ углубленіями между ними, причемъ въ каждое углубленіе помѣщено 9 проволокъ. *D. Кольцо съ широкими зубцами*, имѣющее 12 широкихъ углубленій, содержащихъ каждое 36 оборотовъ проволоки. Длина всѣхъ этихъ кольцевыхъ сердечниковъ, параллельно оси, равнялась 150 сант.

Четыре ротора, изображенные на фиг. 110, были слѣдующіе:

Фиг. 110.



Опытные роторы и статоры Броуна.

a) массивный цилиндръ изъ кованнаго желѣза, снабженный 44 парами каналовъ; *b*) массивный цилиндръ двутавровой формы, подобной Сименсовской челнокообразной арматурѣ, только безъ обмотки; *c*) пластинчатый желѣзный цилиндръ, составленный изъ отдѣльныхъ дисковъ и снабженный 30 отверстіями около самой периферіи, въ которыя вставлены сплошные мѣдные стержни въ 10 мил. въ діаметрѣ, соединенные между собой на концахъ мѣдными кольцами, такъ что все образуетъ родъ бѣличьяго колеса;

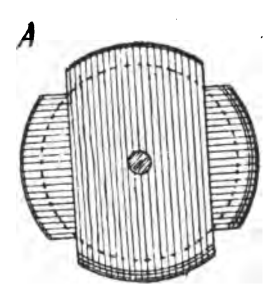
d) массивный цилиндръ изъ кованаго желѣза, окруженный внѣшней мѣдной оболочкой въ 4 мил. толщиной. Кромѣ этихъ четырехъ роторовъ было еще шесть другихъ, такихъ же размѣровъ, именно: *e*) простой массивный цилиндръ изъ кованаго желѣза; *f*) массивный цилиндръ изъ чугуна; *g*) массивный цилиндръ изъ стали; *h*) цилиндръ изъ кованаго желѣза съ четырьмя высверленными широкими каналами (показанными на черт. 110 пунктиромъ и обозначенными буквой *h*); *i*) стальная болванка, имѣвшая форму цилиндра съ двумя срѣзанными боками; *k*) двутавровая болванка, подобная *b*, но только построенная изъ листового желѣза, и наконецъ *l*) массивный цилиндръ изъ кованаго желѣза съ отверстіями, т. е. цилиндръ, подобный *a*, съ замкнутыми на себя мѣдными неизолированными проволоками, продѣтыми сквозь отверстія.

Изъ всѣхъ этихъ роторовъ пластинчатый двутавровый дѣйствовалъ хуже всѣхъ—онъ отказывался вращаться при всякой нагрузкѣ. Массивный цилиндръ изъ кованаго желѣза казался лучшимъ роторомъ, чѣмъ цилиндръ изъ чугуна, тогда какъ цилиндръ съ мѣдной оболочкой оказался при всѣхъ внѣшнихъ кольцахъ лучше ихъ обоихъ. Испытанія производились какъ при помощи нажима, такъ и при помощи небольшой динамомашины, энергія которой измѣрялась электрическимъ путемъ. Оказалось, что какое бы внѣшнее кольцо ни брать, лучшимъ роторомъ былъ пластинчатый цилиндръ съ мѣдной бѣличьей клѣткой.

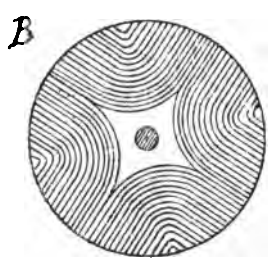
Изъ четырехъ колецъ худшимъ оказалось кольцо *B* съ гладкой поверхностью. Оба кольца съ зубцами дали большій моментъ вращенія, чѣмъ кольцо съ обмоткой, помѣщенной въ каналахъ, но зато оба они, особенно *D* (съ широкими зубцами), сильно грѣли всѣ массивные роторы и производили очень непріятный звукъ. При употребленіи кольца съ обмоткой въ каналахъ, массивные роторы грѣлись слабѣе, что же касается ротора въ видѣ бѣличьяго колеса съ изолированными проводниками, то его желѣзная часть не грѣлась вовсе, а мѣдная грѣлась, но очень мало. Эти результаты заставили склониться въ пользу обмотокъ въ каналахъ, какъ для ротора, такъ и для статора, т. е. въ пользу конструкціи, которая уже вполнѣ оправдала себя.

Едва ли другіе піонеры этого дѣла продѣлали подобные опыты. Однако, весьма интересно сравнить между собою различныя формы обмотокъ, предложенныя различными изобрѣтателями въ различное время. Большинство рисунковъ роторовъ, помѣщенныхъ на фиг. 111, взяты изъ патентовъ. Подъ каждымъ подписанъ годъ.

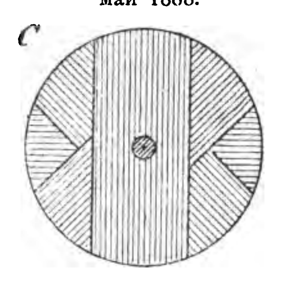
Фиг. 111.



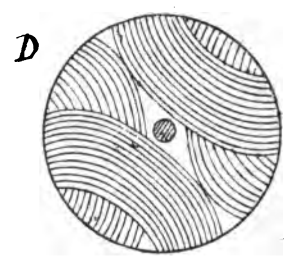
Двухполюсное поле Тесла
май 1888.



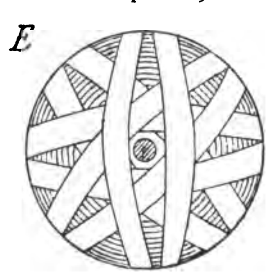
Четырехполюсное поле Тесла
декабрь 1889.



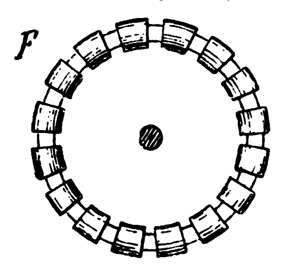
Четырехполюсное поле Тесла
декабрь 1889.



Двухполюсное поле Тесла
декабрь 1889.



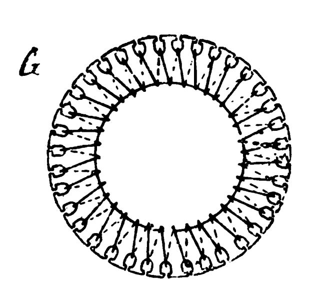
Двухполюсное поле Тесла
январь 1891.

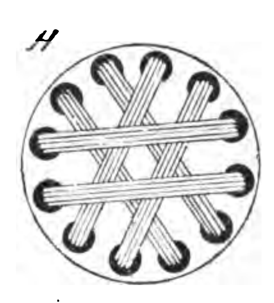


Четырехполюсное поле Тесла
декабрь 1889.

Различныя формы ротора.

Фиг. 111.





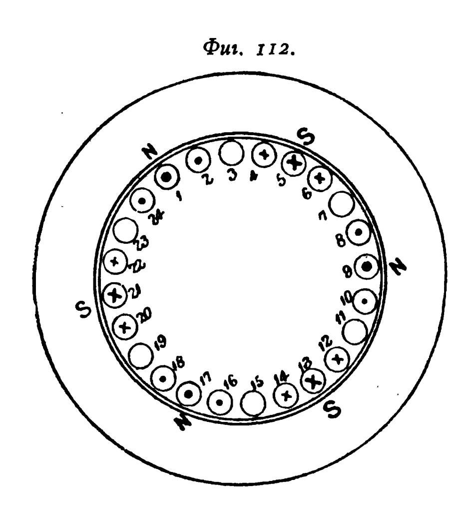
Четырехполюсное поле комп. Helios 1897. Четырехполюсное поле Добровольскаго 1889.

Различныя формы ротора.

Чертежъ *A* представляетъ изъ себя роторъ, предложенный Тесла въ 1888 г., имѣющій двѣ замкнутыя цѣпи, намотанныя на пластинчатомъ сердечникѣ, подъ прямымъ угломъ другъ къ другу, онъ предназначенъ для двухполюснаго поля. Роторъ *B* предложенъ полутора-годами позже и предназначенъ для четырехполюснаго поля. Роторъ *C* предназначался для четырехполюснаго поля, но на самомъ дѣлѣ онъ пригоденъ только для двухполюснаго или шестиполюснаго, такъ какъ его обмотки помѣщены по діаметрамъ. Понятно, что онъ годенъ только для поля, въ которомъ есть перемѣщающійся полюсъ *N*, діаметрально противуположный тоже перемѣщающемуся полюсу *S*. Наоборотъ, роторъ *D*, который Тесла предназначалъ для двухполюснаго поля, на самомъ дѣлѣ пригоденъ для четырехполюснаго. Обмотка *E* раціональна для двухъ-, шести- или десятиполюснаго поля, но не для четырехполюснаго и не для восьмиполюснаго. Роторъ *F* имѣетъ простую Граммовскую кольцевую обмотку, состоящую изъ ряда отдѣльныхъ катушекъ, составляющихъ одну или нѣсколько замкнутыхъ цѣпей. Такой роторъ былъ бы весьма плохимъ, особенно, если соединить всѣ катушки въ одну замкнутую цѣпь, такъ какъ индуктируемыя въ немъ электродвижущія силы будутъ противуположны другъ другу. Такимъ же недостаткомъ обладаетъ и обмотка *G*, предложенная Керперомъ, инженеромъ компаніи *Helios* въ 1887 г. Обмотку *H* предложилъ въ 1889 году Доливо-Добровольскій.

Обмотка ротора. Здѣсь умѣстно поговорить о наилучшемъ способѣ соединенія проводниковъ на роторѣ, т. е. о лучшемъ способѣ обматыванія его, въ случаѣ, если его снабжаютъ настоящей проволочной обмоткой. Какъ было уже замѣчено раньше, наилучшее дѣйствіе получается тогда, когда токи, идущіе внизъ въ полѣ одного направленія (одной полярности), возвращаются вверхъ въ полѣ обратнаго направленія (обратной полярности). Поэтому въ двухполюсной машинѣ части одной и той же обмотки должны отстоять на 180°, въ четырехполюсной на 90°, въ шестиполюсной на 60° и т. д. Эти условія можно выполнить при помощи различной группировки соединеній, и въ случаѣ маленькихъ машинъ, они не мѣшаютъ примѣненію обмотокъ замкнутыхъ на себя и имѣющихъ форму бѣличьяго колеса, но здѣсь, особенно въ случаѣ большихъ машинъ, необходимо принять во вниманіе еще одно условіе, именно необходимость принять такой способъ группировки обмотокъ, который позволялъ бы при пусканіи въ ходъ введеніе дополнительнаго сопротивленія, имѣющаго двойную цѣль (см. конецъ гл. VI и иачало VII): увеличснія начальнаго момента вращенія и предупрежденія слишкомъ сильнаго усиленія тока при включеніи двигателя въ цѣпь.

Фиг. 112.

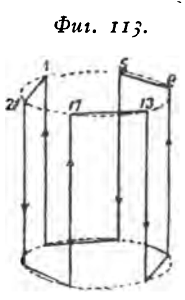


Чтобы понять лучше способы обмотки, разсмотримъ частный случай. Именно, возьмемъ роторъ съ 24 проводниками, помѣщенными въ 24 каналахъ, высверленныхъ въ сердечникѣ, предназначенный для помѣщенія въ шестиполюсномъ вращающемся полѣ. Если поле вращается относительно ротора слѣва направо и полюсъ N проходитъ въ разсматриваемый моментъ передъ проводникомъ № 1 (фиг. 112), индуктируя въ немъ электродвижущую силу, направленную вверхъ (т. е. силу, стремящуюся создать токъ, напра-

вленный къ читателю), то электродвижущія силы, одинаковыя по величинѣ и направленію, создадутся и въ проводникахъ № 9 и № 17, тогда какъ въ проводникахъ №№ 5, 13 и 21 электродвижущія силы будутъ по величинѣ равны предыдущимъ, но направлены обратно. Для полученія наилучшаго дѣйствія эти шесть проводниковъ надо соединить между собою. Это соединеніе можно произвести различными способами, о которыхъ мы и поговоримъ. Замѣтимъ только, что мы будемъ дальше называть такіе проводники «подобными».

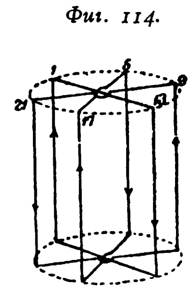
Способъ № 1. Всѣ подобные проводники послѣдовательно. Если соединить всѣ шесть проводниковъ послѣдовательно, въ видѣ зигзагообразной или волнообразной обмотки, то они образуютъ замкнутую цѣпь (фиг. 113). Въ разсматриваемомъ нами случаѣ такихъ замкнутыхъ цѣпей будетъ четыре, такъ какъ проводники 2, 6, 10, 14, 18 и 22 составятъ вторую цѣпь, а остальные — другія двѣ.

Фиг. 113.

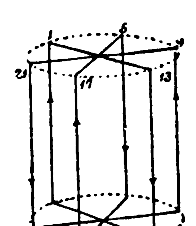


Способъ № 2. Подобные проводники соединены діаметральными соединительными проводами въ отдѣльныя группы. Соединимъ каждый проводникъ съ другимъ, лежащимъ на противуположномъ концѣ діаметра. Тогда получимъ для каждыхъ шести подобныхъ проводниковъ три замкнутыя цѣпи (фиг. 114), для

Фиг. 114.



Фиг. 115.

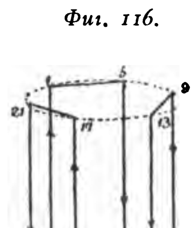


всего же ротора 12 отдѣльныхъ цѣпей. Такъ какъ электродвижущія силы, направленныя вверхъ съ одной стороны и внизъ съ другой, равны, то нѣтъ никакой причины не соединить всѣ обмотки въ точкахъ скрещенія (фиг. 115), что эквивалентно

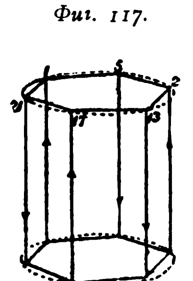
простому соединенію на концахъ всѣхъ 24 проводниковъ, т. е. замыканію ихъ всѣхъ на себя.

Способъ 3. Попарное соединеніе сосѣднихъ подобныхъ проводниковъ. Соединимъ каждый проводникъ въ одну замкнутую цѣпь съ сосѣднимъ подобнымъ проводникомъ. Въ результатѣ, какъ видно изъ фиг. 116, получится три независимыхъ замкнутыхъ

Фиг. 116.

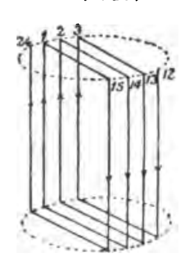


Фиг. 117.



цѣпи, на всемъ же роторѣ — двѣнадцать. Очевидно, не будетъ никакой разницы, соединимъ ли мы проводникъ № 1 съ № 5 или съ № 21, поэтому устройство, указанное на фиг. 117, гдѣ всѣ проводники соединены между собою шестиугольными коннекторами, будетъ столь же дѣйствительно. Итакъ, мы опять приходимъ къ конструкціи, подобной бѣличьему колесу, при которой всѣ проводники замкнуты на себя. Ясно, что способы соединенія № 2 и № 3 въ электрическомъ смыслѣ одинаковы, способъ же № 3 только болѣе удобенъ въ смыслѣ механическаго выполненія.

Фиг. 118.



Способъ № 4. Соединеніе сосѣднихъ проводниковъ, какъ если бы они были подобными. Принимая менѣе выгодное рѣшеніе, т. е. пренебрегая легкой разностью фазъ и считая, что всѣ сосѣдніе проводники одновременно испытываютъ одинаковое дѣйствіе, мы можемъ комбинировать группы сосѣднихъ проводниковъ, какъ если бы они были подобны. Напримѣръ, какъ на фиг. 118, мы можемъ взять проводники №№ 24, 1, 2 и 3 и проводники №№ 12, 13, 14 и 15 и комбинировать ихъ различнымъ образомъ. Такъ, мы можемъ соединить ихъ въ четыре независимыхъ

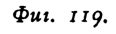
замкнутыхъ цѣпи: № 24 съ № 15, № 1 съ № 14, № 2 съ № 13 и № 3 съ № 12. Или же мы можемъ соединить всѣ эти проводники параллельно, соединяя между собою №№ 1, 2, 3 и 24 и соединяя ихъ на обоихъ концахъ съ №№ 12, 13, 14 и 15, тоже соединенными между собою. Наконецъ, мы можемъ соединить всѣ проводники послѣдовательно въ одну общую замкнутую цѣпь Въ этомъ случаѣ всѣ 24 проводника образуютъ три отдѣльныхъ группы, изъ 8 проводниковъ каждая.

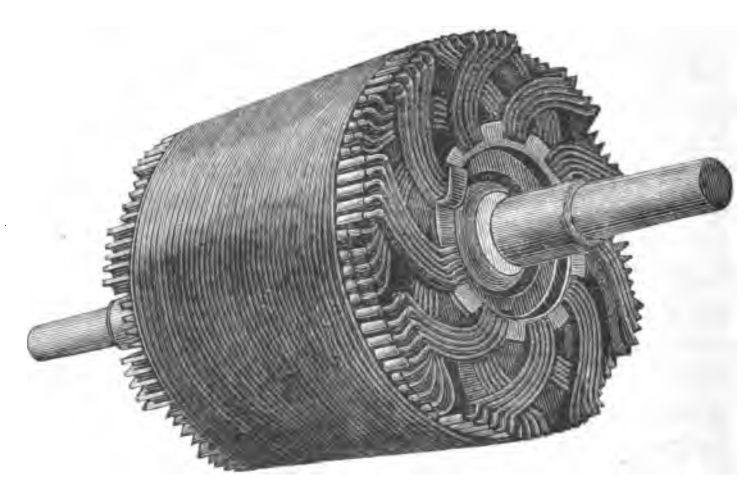
Другой способъ соединенія, электрически эквивалентный предыдущему, состоитъ въ соединеніи проводниковъ №№ 1, 2, 3 и 4 съ №№ 5, 6, 7 и 8, пользуясь этими послѣдними какъ возвратными. Въ этомъ случаѣ, если проводники въ каждой группѣ соединять послѣдовательно, то всѣ 24 проводника образуютъ три независимыхъ цѣпи.

Очевидно, что при соединеніи «подобныхъ» проводниковъ въ замкнутыя цѣпи, независимо отъ того, будутъ ли нѣкоторые изъ нихъ соединены послѣдовательно или параллельно, сила тока въ каждомъ проводѣ будетъ при всякомъ соединеніи одна и та же, такъ какъ при послѣдовательномъ соединеніи, наприм., по 2, 4, 6 и больше проводниковъ, хотя сопротивленіе и возрастетъ, но во столько же разъ возрастетъ и электродвижущая сила въ цѣпи. Съ этой точки зрѣнія, пока мы имѣемъ дѣло только съ «подобными» проводниками, на работу двигателя не имѣетъ ни малѣйшаго вліянія то, какъ соединены проводники въ независимыя цѣпи — послѣдовательно или параллельно. Но, если желаютъ устроить приспособленія для введенія въ цѣпь ротора сопротивленій для пусканія въ ходъ, то становится обязательнымъ послѣдовательное соединеніе, какъ для уменьшенія числа контактныхъ колецъ и щетокъ, такъ и для уменьшенія силы тока, съ которымъ приходится имѣть дѣло, а также и для уменьшенія вліянія сопротивленій контактовъ, щетокъ и т. п., послѣ того какъ добавочное сопротивленіе будетъ выключено.

Способъ № 5. Соединеніе для включенія сопротивленія, служащаго для пусканія въ ходъ. Въ случаяхъ, когда, съ цѣлью увеличить начальный моментъ вращенія, въ цѣпь ротора, вводятъ дополнительныя сопротивленія, обыкновенно снабжаютъ роторъ контактными кольцами и щетками. Для избѣжанія усложненій

при этомъ преимущественно соединяютъ обмотки, раздѣленныя на три группы, звѣздой, такъ что три изъ ихъ концовъ соединяются вмѣстѣ, три же другіе конца присоединяются къ тремъ кольцамъ, укрѣпленнымъ на оси ротора. Отъ трехъ щетокъ, касающихся колецъ, идутъ проволоки къ тремъ соотвѣтственнымъ сопротивленіямъ (часто жидкимъ реостатамъ, наприм., устроеннымъ изъ двухъ угольныхъ пластинъ, въ качествѣ электродовъ, погруженныхъ въ водный растворъ углекислой соды), и оттуда къ общей точкѣ. Подобнаго рода устройство, которое изображено на фиг. 106 ter, примѣняется какъ въ случаяхъ когда статоръ питается двухфазнымъ, такъ и въ случаяхъ когда онъ питается трехфазнымъ токомъ. Для такого соединенія тремя группами, однако, предпочтительно, чтобы число проводниковъ, приходящихся на полюсъ вращающагося поля, было дѣлимо на три. Это условіе именно не выполнено въ томъ случаѣ, который мы разсматриваемъ, такъ какъ мы имѣемъ 24 проводника въ шестиполюсномъ полѣ. При роторѣ въ 18 или 36 проводниковъ оно было


Фиг. 119.



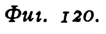
Обмотанный роторъ компаніи Эрликонъ.

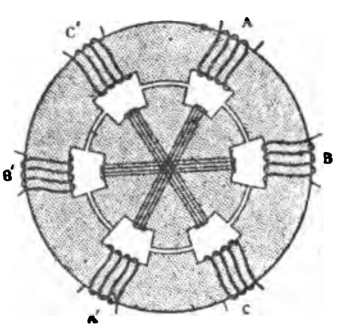
бы выполнено. Правда, всю обмотку можно и въ нашемъ случаѣ раздѣлить на три симметричныя группы (какъ, наприм., при сое-

диненіи по способу № 4), но эти три группы нельзя будетъ соединить звѣздой, если только для общаго возврата не сдѣлать четвертаго контактнаго кольца.

На фиг. 119 представленъ уже обмотанный роторъ, построенный заводомъ Эрликонъ.

Не лишена значенія одна деталь устройства ротора въ видѣ бѣличьей клѣтки. Во всѣхъ случаяхъ, когда число проводовъ на роторѣ таково, что оно имѣетъ общихъ множителей съ числомъ полюсовъ во вращающемся полѣ, роторъ стремится (особенно при началѣ движенія) работать какъ простой трансформаторъ. Такъ приборъ, представленный на фиг. 120, былъ бы прекраснымъ неподвижнымъ трехфазнымъ трансформаторомъ, въ обмоткахъ внутренней части котораго вращающееся поле просто индуктировало бы синхроничные трехфазные токи. Стремленіе вращаться у этой части было бы весьма мало. Нѣчто въ этомъ родѣ будетъ стремиться произойти и въ каждомъ индукціонномъ двигателѣ, если число проводниковъ или группъ проводниковъ ротора соотвѣтствуетъ числу проводниковъ на статорѣ. Чтобы избѣжать этого, обыкновенно проэктируютъ роторъ и статоръ съ различнымъ числомъ проводниковъ, или группъ проводниковъ; и въ случаѣ, когда всѣ обмотки замкнуты вмѣстѣ на себя, эту предосторожность доводятъ до того, что выбираютъ число проводниковъ такъ, чтобы они не имѣли даже общаго множителя. Въ качествѣ примѣра можно привести двигатель Броуна (фиг. 105), у котораго первичная обмотка статора состоитъ изъ 40 проводниковъ, а обмотка ротора (въ видѣ бѣличьяго колеса) имѣетъ всего 37 стержней.

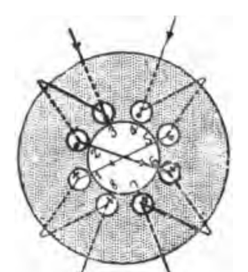

Фиг. 120.



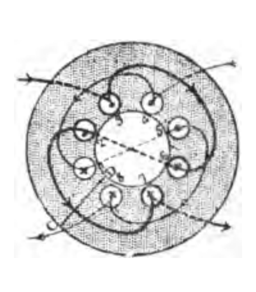
Устройство статора. Обмотки статоровъ въ двигателяхъ обыкновенно принадлежатъ къ типу барабанныхъ, причемъ проводники проходятъ черезъ каналы, высверленные въ желѣзныхъ сердечникахъ, какъ это уже показано на фиг. 37, 41 и 42.

Однако у статоровъ, предназначенныхъ для маленькихъ двигателей, иногда устраивается и граммовская (кольцевая) обмотка, какъ это показано на фиг. 49 и 57. При изученіи теоріи двигателей для простоты обыкновенно разсматриваютъ простую обмотку, подобную изображенной на фиг. 49, при которой поле пронизываетъ роторъ по діаметру, поэтому полезно разсмотрѣть связь между такимъ устройствомъ и многополюснымъ статоромъ съ барабанной обмоткой, обыкновенно примѣняемымъ на практикѣ. Фиг. 121 изображаетъ обмотку, подобную представленной на

Фиг. 121.



Фиг. 122.



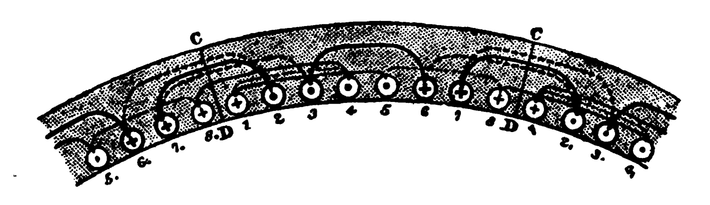
фиг. 49, съ тою только разницею, что на ней каждая катушка представлена состоящей изъ одного оборота проводника, продѣтаго сквозь каналы въ сердечникѣ. На фиг. 122 представленъ тотъ же сердечникъ, снабженный барабанной обмоткой, причемъ направленія тока въ дѣйствующихъ проводникахъ остались прежнія. Точки въ отверстіяхъ обозначаютъ токи, направленные вверхъ, крестики—токи, идущіе внизъ сквозь плоскость чертежа *). Представимъ себѣ теперь, что статоръ разрѣзанъ по

*) Т. е. точками обозначены токи идущіе къ читателю, а крестиками — токи идущіе отъ читателя. Для удобства запоминанія этого обозначенія слѣдуетъ представить себѣ, что вдоль по проводу летитъ стрѣла, направленная по направленію тока. Тогда, если токъ направленъ къ читателю, то онъ увидитъ остріе стрѣлы (точку). Если же токъ направленъ отъ читателя, то и стрѣла летитъ отъ него и онъ увидитъ заднее ея опереніе (крестикъ).
Прим. пер.

линіи *CD* и нѣсколько выпрямленъ въ дугу гораздо большаго радіуса.

Положимъ, кромѣ того, что нѣсколько такихъ выпрямленныхъ частей сложены рядомъ. Мы получимъ такимъ образомъ обмотку, изображенную на фиг. 123, которая принципіально ничѣмъ не отли-

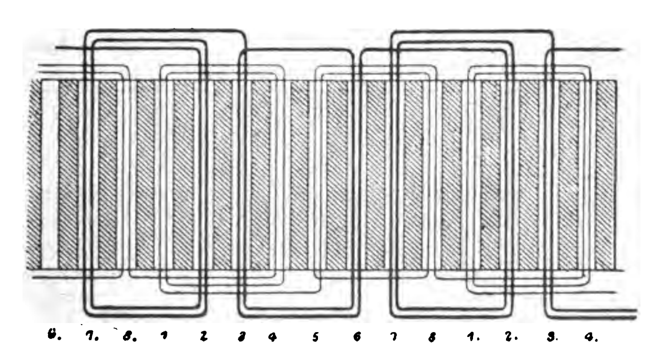
Фиг. 123.



чается отъ обмотки двухфазнаго двигателя Броуна, изображеннаго на фиг. 171.

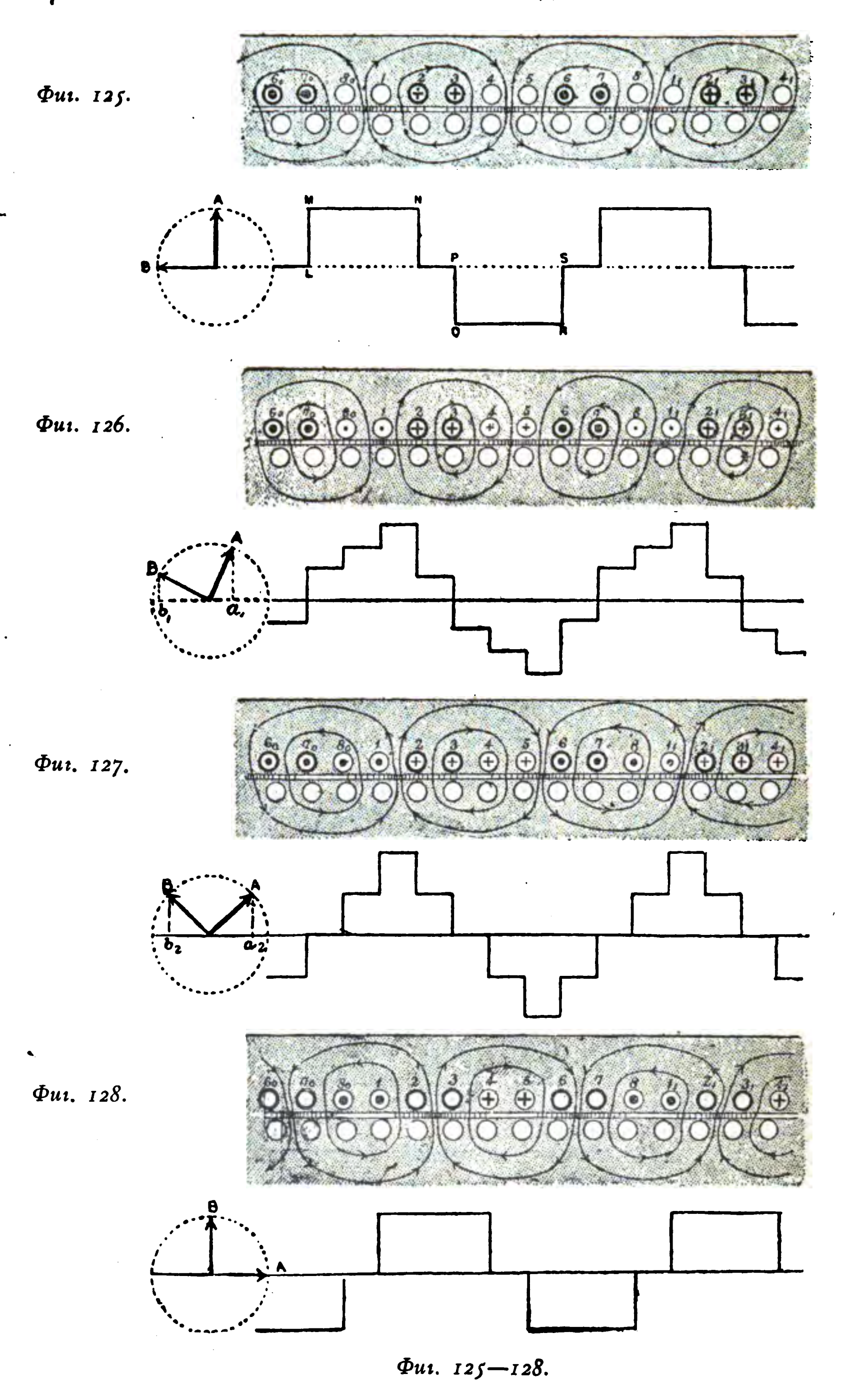
Проволока каждой катушки, напримѣръ катушки помѣщающейся въ каналахъ *3* и *6*, можетъ дѣлать нѣсколько оборотовъ раньше, чѣмъ перейти другіе каналы для образованія другихъ катушекъ. Напримѣръ, въ упомянутомъ двигателѣ Броуна проволока, выходящая изъ канала 3, входитъ въ каналъ 6, затѣмъ опять въ 3, опять въ 6 и такъ нѣсколько разъ. Затѣмъ только она переходитъ въ каналъ 2_1, изъ котораго поступаетъ въ каналъ 7

Фиг. 124.



и дѣлаетъ въ этихъ каналахъ нѣсколько оборотовъ раньше, чѣмъ перейти въ каналъ 3_1, и т. д.

Эта обмотка изображена въ разверткѣ на фиг. 124, причемъ



Фиг. 125.

Фиг. 126.

Фиг. 127.

Фиг. 128.

Фиг. 125—128.

каждая катушка показана состоящей только изъ двухъ оборотовъ.

Движеніе поля. Характеръ движенія поля въ многополюсномъ статорѣ, снабженномъ обмоткой вышеописаннаго устройства, можетъ быть изученъ на рисункахъ 125—128, на которыхъ поверхность статора представлена не изогнутой, а прямой.

Отверстія, черезъ которыя проходятъ проводники статора, представлены верхнимъ рядомъ кружковъ, нижній же рядъ кружковъ представляетъ отверстія для проводниковъ ротора (тутъ, однако, не приняты совершенно во вниманіе токи въ роторѣ). Между статоромъ и роторомъ оставлено небольшое воздушное пространство. Для того, чтобы можно было легче различать проводники, принадлежащіе къ каждой цѣпи статора, отверстія для одного изъ нихъ (которыя мы назовемъ № 1), изображены болѣе толстой линіей. Въ часовой діаграммѣ, налѣво отъ каждаго чертежа, толстая черта *A* показываетъ фазу тока въ цѣпи № 1, тонкая же черта *B* фазу тока въ цѣпи № 2. На чертежѣ 125, сила тока въ цѣпи № 1 достигла максимума, въ цѣпи же № 2 она равна нулю. Магнитныя линіи будутъ проходить въ желѣзѣ по путямъ, подобнымъ указаннымъ стрѣлками. *Магнитодвижущая сила*, создаваемая катушками статора въ каждой точкѣ его поверхности, представлена прямугольными ломанными линіями, помѣщенными подъ каждымъ рисункомъ. Эти ломанныя линіи получены слѣдующимъ образомъ: въ пространствѣ между каналами 2 и 7_0, существуетъ нѣкоторая магнитодвижущая сила, создаваемая токами проходящими по проводникамъ 6_0, 7_0, 2 и 3. Ея величина въ любой моментъ можетъ быть представлена проэкціей радіуса *A* на вертикальную линію (такъ какъ токи въ катушкахъ пропорціональны этой проэкціи). Поэтому мы можемъ начертить линію *LM*, равную проэкціи радіуса *A*. Тогда ординаты части *MN* представятъ приблизительно магнитодвижущую силу въ каждой точкѣ поверхности между каналами 7_0 и 2. Магнитодвижущая сила въ пространствѣ между каналами 2 и 3 равна нулю, такъ какъ тутъ проводники, лежащіе съ одной стороны, нейтрализуютъ проводники, расположенные съ другой. Въ пространствѣ между каналами 3 и 6 магнитодвижущая сила будетъ имѣть обратное направленіе и изобразится линіей *PQBS*. расположенной ниже нулевой линіи.

На чертежѣ 126 фаза тока передвинута на $\frac{1}{16}$ періода впередъ. Если мы начертимъ для катушекъ цѣпи № 1 кривую магнитодвижущихъ силъ, подобную предъидущей, принимая ее равной длинѣ Aa_1 и такую же кривую начертимъ для цѣпи № 2, принимая для нея магнитодвижущую силу равной длины Bb_1, то окончательная (суммарная) магнитодвижущая сила изобразится линіей, начерченной подъ фиг. 126.

На фиг. 127 токъ по фазѣ передвинутъ еще на $\frac{1}{16}$ періода, такъ что сила токовъ въ обѣихъ цѣпяхъ одинакова. Ломанная линія подъ этой фигурой изображаетъ суммарную магнитодвижущую силу въ этомъ случаѣ. Еще черезъ $\frac{1}{16}$ періода, эта ломанная опять приняла бы неправильную форму, подобную начерченной подъ фиг. 126 (она здѣсь не представлена). Спустя еще $\frac{1}{16}$ періода, сила тока въ цѣпи № 1 станетъ равной нулю, въ цѣпи же № 2 достигнетъ максимума, такъ что линія магнитодвижущей силы (фиг. 128) будетъ подобна линіи, представленной на фиг. 125, только сдвинутой на двойной промежутокъ между каналами. Черезъ $\frac{1}{4}$ періода линія передвигается еще на такую же длину и еще черезъ $\frac{1}{2}$ періода перемѣстится на длину, занимаемую восемью проводниками и приметъ положеніе, показанное на фиг. 125, только относительно слѣдующей группы катушекъ. Полюсы при этомъ пройдутъ полный циклъ.

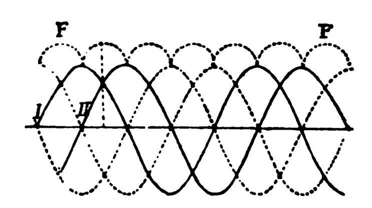
Вычерченныя ломанныя линіи, представляя приблизительно распредѣленіе магнитодвижущихъ силъ, не представляютъ однако распредѣленія магнитныхъ потоковъ, такъ какъ тутъ не можетъ уже быть такихъ внезапныхъ перемѣнъ, какъ изображаемыя углами начерченныхъ линій. Природное стремленіе силовыхъ линій распространяться, а также и то обстоятельство, что онѣ движутся впередъ, пересѣкая проводники, загругляютъ углы линіи магнитодвижущихъ силъ и кривая, представляющая величины плотности магнитнаго потока въ каждой точкѣ, будетъ плавной кривой, весьма близкой къ синусоидѣ. Дѣйствительно, всякое уклоненіе отъ синусоиды будетъ нерегулярность, которой будутъ сильно

мѣшать токи въ проводникахъ. Поэтому мы, не дѣлая большой ошибки, можемъ считать, что распредѣленіе плотности магнитнаго потока происходитъ по синусоидальной кривой.

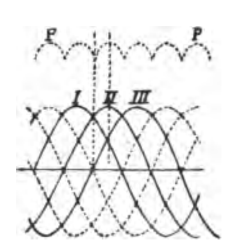
Надо замѣтить, что наибольшая ордината ломанной линіи на чер. 127 больше наибольшей ординаты линіи на чер. 125 въ отношеніи $\sqrt{2}:1$. Слѣдовательно, наибольшая плотность потока стремится мѣнять свою величину. Однако всякому ея измѣненію препятствуютъ токи въ проводникахъ ротора, такъ что въ результатахъ эти измѣненія будутъ очень незначительны.

Въ 1891 г. Доливо-Добровольскій далъ кривую, представленную на фиг. 129, въ которой дѣйствія двухъ намагничивающихъ токовъ I и II въ простомъ двухфазномъ двигателѣ сложены вмѣстѣ, образуя поле измѣняющагося напряженія, представляемое верхней кривой *FF*. Эти измѣненія напряженія достигаютъ 40%. На фиг. 130 представлена кривая для трехфазнаго двигателя, варіаціи которой достигаютъ лишь 14%. Чѣмъ больше число фазъ, тѣмъ меньше становятся измѣненія въ напряженіи поля. Добровольскій думалъ, что такія колебанія въ напряженіи невыгодны для двигателя и уменьшаютъ моментъ вращенія. Но теперь, при знакомствѣ съ однофразными двигателями, выясняется что едва ли это такъ. Эти колебанія, насколько они могутъ происходить вопреки противодѣйствующему вліянію сосѣднихъ проводниковъ, дѣйствуютъ такъ, какъ еслибы на вращающееся постоянное поле былъ наложенъ рядъ неподвижныхъ перемѣнныхъ полей, имѣющихъ полюсы во всѣхъ точкахъ, гдѣ группа проводниковъ, принадлежащихъ къ одной цѣпи, лежитъ рядомъ съ группой проводниковъ, принадлежащихъ къ другой цѣпи, и частоту равною частотѣ питающаго тока.

Фиг. 129.



Фиг. 130.



Плотность магнитнаго потока. Наибольшая плотность потока (магнитная индукція) **B**, которую можно допускать въ желѣзныхъ частяхъ двигателей, зависитъ отъ частоты питающихъ токовъ.

Въ желѣзѣ потеря энергіи на циклъ, вслѣдствіе гистерезиса, ростетъ не пропорціонально плотности потока. Если послѣднюю увеличить съ 4.000 до 8.000, то потеря энергіи отъ гистерезиса почти учетверится. Штейнмецъ нашелъ, что потери пропорціональны 1,6 степени **B**. При большихъ плотностяхъ желѣзные сердечники будутъ слѣдовательно перегрѣваться, если только частота токовъ не сдѣлана достаточно малой. Отсюда слѣдуетъ, что при малыхъ частотахъ допустимы такія плотности потока, которыя не могутъ быть терпимы при большихъ. Кольбенъ даетъ для плотностей **B** потока слѣдующія величины:

Для	40	цикловъ		**B**=6.500—5.500
»	50	»		6.000—5.000
»	60	»		5.000—4.500
»	80	»		4.500—4.000
»	100	»		4.000—3.500
»	120	»		3.500—3.000

Въ желѣзѣ между каналами плотности потока часто бываютъ гораздо больше, чѣмъ данныя въ этой таблицѣ. Такъ, при частотѣ въ 40 періодовъ плотность можетъ достигать 11.500.

Толщина желѣза въ статорѣ (*CD* на фиг. 123) можетъ быть не многимъ меньше, чѣмъ половина разстоянія между центрами сосѣднихъ полюсовъ, такъ чтобы представлять достаточно легкій путь для магнитныхъ линій, распространяющихся какъ показано на чертежахъ 24 и 25.

Глава VI.

Элементарная теорія многофазныхъ двигателей.

При разсмотрѣніи теоріи многофазныхъ двигателей прежде всего надо найти общія соотношенія между скоростью вращенія магнитнаго поля, скоростью вращенія подвижной части машины, сопротивленіями отдѣльныхъ цѣпей, моментомъ вращенія и отдачей машины. Затѣмъ уже можно приступить къ аналитическому изученію этой теоріи. Для простоты мы возьмемъ двухполюсную машину, въ которой желѣзный сердечникъ статора имѣетъ форму, указанную на фиг. 105 и въ которой воздушный промежутокъ между статоромъ и роторомъ такъ малъ, что магнитной утечкой можно пренебречь. Предположимъ, кромѣ того, что вращающееся магнитное поле производится двухфазными или трехфазными токами, циркулирующими въ статорѣ. Токи, индуктируемые въ роторѣ (какъ мы увидимъ въ слѣдующей главѣ), тоже производятъ магнитное поле, которое складываясь съ магнитнымъ полемъ статора, образуетъ результирующее вращающееся поле. Это послѣднее и есть то поле, отъ котораго зависятъ электродвижущія силы въ проводникахъ и моментъ вращенія. Мы будемъ считать, что оно состоитъ изъ однороднаго потока, проходящаго по направленію діаметра сквозь роторъ и пересѣкающаго при вращеніи обмотки статора и ротора.

Пусть Ω будетъ угловая скорость вращающагося магнитнаго поля, равная въ двухполюсной машинѣ $2\pi n$, гдѣ n есть частота

тока. Если машина многополюсная, напримѣръ имѣющая m паръ полюсовъ, то угловая скорость будетъ $\Omega = \frac{2\pi n}{m}$.

Пусть далѣе ω будетъ угловая скорость вращающейся части машины (ротора). Она равняется $\omega = 2\pi n_2$, гдѣ n_2 есть истинное число оборотовъ ротора въ секунду.

Пусть еще T будетъ моментъ вращенія ротора,

W — количество энергіи (общее число ваттовъ), сообщаемое статоромъ ротору.

и w — количество энергіи (полезные ватты) въ дѣйствительности идущее на вращеніе ротора.

Величина $(\Omega - \omega)$ — будетъ *сдвигомъ* [1]) ротора относительно поля, такъ какъ это есть разность ихъ угловыхъ скоростей.

Если угловая скорость поля на величину $(\Omega - \omega)$ больше угловой скорости ротора, то ясно, что индуктивное дѣйствіе на цѣпи ротора будетъ какъ разъ такое, какъ если-бы роторъ вращался въ обратномъ направленіи со скоростью $(\Omega - \omega)$, а поле оставалось бы неподвижнымъ.

Величина $(W - w)$ — есть количество энергіи, идущее на нагрѣваніе проводниковъ и желѣза ротора, такъ какъ это есть разность между энергіей, сообщенной ротору и энергіей, имъ утилизируемой.

Величина W пропорціональна Ω и T и слѣдовательно, если выразить эти величины въ соотвѣтствующихъ единицахъ, то можно написать $W = T\Omega$. Что касается w, то эта величина пропорціональна T и ω, слѣдовательно, по предыдущему $w = T\omega$. Отсюда, раздѣляя послѣднее равенство на первое, получимъ

$$\frac{w}{W} = \frac{\omega}{\Omega}$$

Это соотношеніе показываетъ, что отдача *ротора* равняется отношенію угловыхъ скоростей. Объ отдачѣ статора мы поговоримъ ниже.

Какъ мы уже говорили, двигатель съ вращающимся магнитнымъ полемъ представляетъ изъ себя нѣчто въ родѣ вращаю-

[1]) Нѣкоторые авторы называютъ *сдвигомъ* (*slip*) отношеніе $\frac{\omega}{\Omega}$. Однако удобнѣе это отношеніе назвать *скольженіемъ* (*slippage*).



щагося трансформатора, въ которомъ обмотка статора и ротора играютъ роли первичной и вторичной обмотокъ. Далѣе, если бы $\omega = \Omega$, то въ проводникахъ ротора вовсе не было бы индуктированныхъ токовъ и статоръ дѣйствовалъ бы просто, какъ реакціонная катушка. Отсюда слѣдуетъ, что если первичный токъ сохраняетъ постоянное напряженіе, то магнитный потокъ въ машинѣ, вращающейся со скоростью Ω, будетъ сохранять при всякихъ нагрузкахъ приблизительно постоянную величину, совершенно такъ же, какъ это бываетъ въ сердечникахъ обыкновенныхъ трансформаторовъ. Это, конечно, справедливо только тогда, когда токъ въ обмоткахъ статора ничѣмъ не уменьшенъ, наоборотъ это не вѣрно въ случаяхъ когда это условіе не выполнено, какъ, напримѣръ, когда послѣдовательно съ катушками статора включены сопротивленія, или же когда двигатель начинаетъ вращаться безъ всякихъ сопротивленій въ цѣпи ротора, какъ это мы увидимъ дальше. Если въ пространствѣ между статоромъ и роторомъ магнитная утечка весьма мала (что и есть на самомъ дѣлѣ въ хорошо спроектированныхъ двигателяхъ), то единственныя электродвижущія силы въ проводахъ на роторѣ будутъ тѣ, которыя образуетъ результирующее магнитное поле и поэтому—наиболѣе сильные токи образуются въ этихъ проводникахъ тогда, когда они будутъ находиться въ частяхъ поля, гдѣ плотность потока наибольшая. Такъ какъ потокъ постояненъ при всѣхъ нагрузкахъ (при выполненіи высказанныхъ выше условіяхъ), то моментъ вращенія будетъ пропорціоналенъ силѣ токовъ въ роторѣ. Эти послѣднія въ свою очередь пропорціональны двигу $(\Omega - \omega)$ слѣдовательно и T будетъ пропорціонально величинѣ $(\Omega - \omega)$ и можно написать

$$T = b\,(\Omega - \omega),$$

гдѣ b есть постоянная величина, зависящая отъ напряженія поля, радіуса ротора, а также длины и сопротивленія проводниковъ на немъ. Теперь мы можемъ написать:

полезные ватты $w = b.\,\omega\,(\Omega - \omega)$

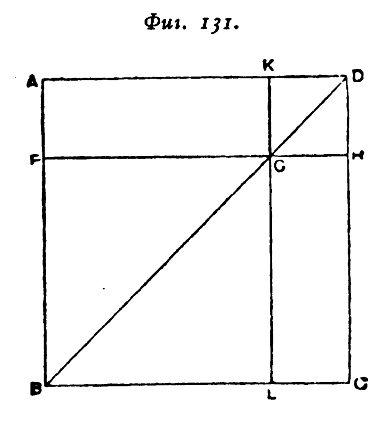
общее число ваттовъ $W = b.\,\Omega\,(\Omega - \omega)$

потерянные ватты $W - w = b\,(\Omega - \omega)^2$.

Мы можемъ здѣсь примѣнить извѣстную діаграмму для отдачи двигателя, начертивъ квадратъ $ABCD$ (фиг. 131), стороны кото-

раго численно равны Ω и откладывая на одной изъ сторонъ длину BF, равную ω. Площадь $AFHD$ изобразитъ общее число доставленныхъ ваттовъ, площадь $AFGK$ или $CLGH$—число полезныхъ ваттовъ, а квадратъ $KGHD$ — число ваттовъ, истраченныхъ на нагрѣваніе проводниковъ ротора. Отдача будетъ приближаться къ единицѣ, когда точка F будетъ приближаться къ точкѣ A и совершенно такъ же, какъ въ двигателяхъ постояннаго тока, если бы реакція арматуры не ослабляла поле, наибольшая работоспособность была бы при $\omega = \frac{1}{2}\Omega$, причемъ отдача была бы всего въ 50%. Мы сейчасъ увидимъ, что когда двигатель вращается со скоростью значительно меньшей нормальной, то магнитная утечка и другія постороннія причины играютъ такую значительную роль, что моментъ вращенія становится меньше, чѣмъ при бо́льшихъ скоростяхъ. Рисунокъ 131, поэтому, примѣнимъ только для случаевъ нормальнаго вращенія. Онъ показываетъ, насколько двигатели съ вращающимся полемъ близки по свойствамъ къ двигателямъ постояннаго тока.

Фиг. 131.



Въ современныхъ хорошихъ двигателяхъ съ вращающимся полемъ, сдвигъ не превосходитъ вообще 4%, исключая очень маленькихъ двигателей, гдѣ при полной нагрузкѣ онъ можетъ достигать 10%.

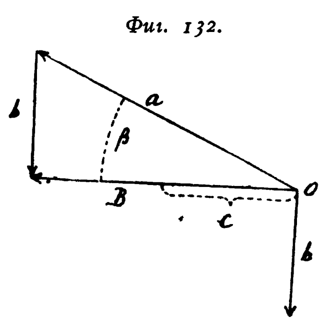
При всѣхъ предыдущихъ разсужденіяхъ не принимались въ соображеніе потери, происходящія отъ нагрѣванія первичной цѣпи (обмотки статора). Эта потеря, совершенно такъ же какъ потеря C^2R въ возбуждающей цѣпи динамо-машины, составляетъ небольшой процентъ всей доставляемой энергіи и можетъ быть легко вычислена, если извѣстно сопротивленіе катушекъ статора. Точно также не были приняты во вниманіе потери отъ гистерезиса въ желѣзѣ статора, на которыя тоже тратится энергія

но которыя тоже малы въ хорошихъ машинахъ. Кромѣ потерь отъ гистерезиса и паразитныхъ токовъ въ желѣзѣ, часть доставляемой двигателемъ энергіи идетъ еще на преодолѣніе тренія въ подшипникахъ.

2. Магнитный потокъ въ двигателѣ.

Выше, сравнивая двигатель съ трансформаторомъ, мы сказали, что магнитный потокъ въ двигателѣ остается почти постояннымъ при всѣхъ нагрузкахъ и кромѣ того видѣли, что въ воздушномъ пространствѣ, между статоромъ и роторомъ, въ различныхъ его точкахъ величина магнитнаго потока мѣняется по закону синусовъ. Пусть плотность потока въ направленіи, въ которомъ онъ наибольшій, будетъ B. Потокъ этой плотности, подобно потоку въ сердечникѣ трансформатора, является результатомъ намагничивающаго дѣйствія обѣихъ обмотокъ, первичной и вторичной. Вотъ какимъ образомъ Каппъ *) изслѣдовалъ этотъ вопросъ подробнѣе. Возьмемъ прямую B (фиг. 132), которая пусть изображаетъ наибольшую плотность потока въ двигателѣ. Въ двухполюсной машинѣ ее можно считать вращающейся по направленію часовой стрѣлки вокругъ точки O какъ центра съ угловой скоростью равной Ω. Это поле образовано совмѣстнымъ дѣйствіемъ первичнаго тока въ статорѣ и вторичнаго (индуктированнаго), тока, въ роторѣ. Эти послѣдніе токи (т. е токи въ роторѣ) находятся въ одной фазѣ съ результирующимъ полемъ (если нѣтъ магнитной утечки) и сила ихъ пропорціональна напряженію этого поля и величинѣ сдвига. Они стремятся произвести поперечное намагниченіе. Ихъ можно изображать прямой c, отложенной отъ точки O по направленію B. Токъ c стремится произвести поперечное поле, пропорціональное

Фиг. 132.



*) Gisbert Kapp „Electric Transmission of Energy" 1894 p. 310. Есть русскій переводъ Д. Голова.

его силѣ. Пусть прямая b, перпендикулярная къ B, изображаетъ это поперечное поле. Длина $b = кс$, гдѣ $к$ есть коеффиціентъ, зависящій отъ магнитнаго сопротивленія магнитной цѣпи и отъ числа оборотовъ въ обмоткѣ ротора. Построимъ треугольникъ $B\,b\,a$, проведя прямую a. Эта прямая и будетъ по величинѣ и по фазѣ представлять магнитное поле, которое должна создавать первичная обмотка статора для того, чтобы результирующее поле было B. Уголъ β есть уголъ на который фаза тока ротора отстаетъ отъ фазы поля, создаваемаго статоромъ.

Далѣе, такъ какъ моментъ вращенія пропорціоналенъ **B** и c, т. е. B и b, то площадь треугольника $a\,B\,b$ и представитъ этотъ моментъ.

Кромѣ того, еще, такъ какъ c зависитъ отъ электродвижущей силы въ проводникахъ, составляющихъ обмотку ротора, то эта величина пропорціональна сдвигу, величинѣ **B** и постоянной, обратно пропорціональной сопрятивленію R, цѣпи ротора. Слѣдовательно мы можемъ исписать:

$$c = \frac{\mathbf{B} \times \text{сдвигъ}}{R}$$

Откуда

$$\text{сдвигъ} = \frac{c\,R}{\mathbf{B}}$$

Подставляя вмѣсто c, его величину $\frac{b}{k}$ получимъ:

$$\text{сдвигъ} = \frac{b}{\mathbf{B}} \times \frac{R}{k}$$

Но $\frac{b}{B}$ равняется тангенсу угла β, слѣдовательно, сдвигъ пропорціоналенъ величинѣ $R\ tang\ \beta$, т. е., если сдвигъ великъ, то и уголъ отставанія β будетъ великъ.

3. Условія работы.

При изученіи условій работы двигателя, мы разсмотримъ три главныхъ случая, причемъ будемъ предполагать, что напряженіе питающаго тока остается все время постояннымъ и что въ машинѣ нѣтъ магнитной утечки.

1) *Начало движенія.* При началѣ движенія $\omega = 0$ и сдвигъ

равняется Ω. Токи въ роторѣ и статорѣ (первичные) достигаютъ громадной силы. Уголъ β, соотвѣтствующій разности фазъ между первичными токами и результирующимъ полемъ будетъ очень великъ. Если нѣтъ магнитной утечки, то моментъ вращенія громаденъ.

2) *Вращеніе при малой нагрузкѣ.* Въ этомъ случаѣ ω очень близка къ Ω и такъ какъ сдвигъ малъ, то и токи въ роторѣ будутъ слабы и реакція ихъ тоже. Уголъ β будетъ малъ и, слѣдовательно, величина *a* немногимъ больше величины B.

3) *Вращеніе при большой нагрузкѣ.* Въ этомъ случаѣ Ω—ω, т. е. сдвигъ, долженъ быть достаточно великъ для того, чтобы позволить образоваться въ роторѣ токамъ, достаточнымъ для произведенія момента вращенія, необходимаго для движенія съ данной скоростью.

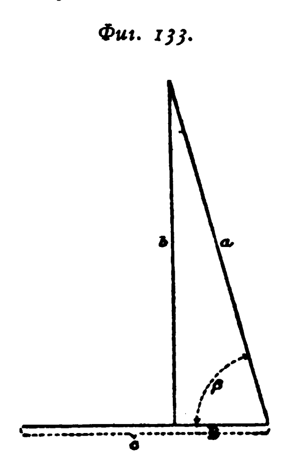
Къ предъидущему можно добавить что, если искусственнымъ путемъ довести скорость до синхронизма напримѣръ, доставляя отъ посторонняго источника энергію для преодолѣнія тренія и т. п., то въ роторѣ токовъ не образуется и моментъ вращенія будетъ равенъ нулю. Если искусственно еще увеличить скорость, такъ чтобы роторъ сталъ вращаться быстрѣе поля, то придется затрачивать энергію на его вращеніе и онъ будетъ уже работать какъ генераторъ, доставляя какъ это мы сейчасъ увидимъ, токъ обратно въ питающую сѣть.

4. Начальный моментъ вращенія.

Мы до сихъ поръ разсматривали двигатель, работающій, такъ сказать, при идеальныхъ условіяхъ, т. е. когда токи въ роторѣ не слишкомъ сильны и когда вліяніемъ магнитной утечки можно пренебрегать. Однако въ моментъ пусканія въ ходъ двигателя сдвигъ настолько великъ, что, если сопротивленіе цѣпи ротора мало, то въ немъ образуются токи громадной силы. Эти токи, совершенно также какъ это бываетъ въ трансформаторахъ, вызовутъ образованіе очень сильныхъ токовъ, нужныхъ для образованія магнитнаго потока, въ первичной цѣпи. Результатъ этого будетъ троякій: Во-первыхъ, значительное количество потребляемой энергіи C^2R будетъ потеряно въ обмоткахъ статора. Во-вторыхъ, амперъ-витки

обмотокъ статора и ротора, противупоставляя другъ другу весьма значительныя магнитодвижущія силы, заставятъ часть силовыхъ линій идти по путямъ, не пронизывающимъ обѣ серіи катушекъ (напримѣръ утечка можетъ происходить черезъ воздушный промежутокъ между статоромъ и роторомъ), и эти линіи вызовутъ образованіе электродвижущихъ силъ въ обмоткахъ статора и ротора, которыя будутъ налагаться на электродвижущія силы, созданныя общимъ полемъ и будутъ имѣть ослабляющее дѣйствіе на токи въ этихъ обмоткахъ. Наконецъ, въ-третьихъ, результирующее поле **B** не только будетъ ослаблено поименованными причинами, но и то слабое поле, которое останется, не будетъ совпадать на фазѣ съ токомъ въ цѣпи ротора, такъ что моментъ вращенія при маломъ сопротивленіи цѣпи ротора не только не будетъ увеличенъ громаднымъ сдвигомъ, но, напротивъ, будетъ значительно уменьшенъ. Это очень легко видѣть пользуясь построеніемъ Каппа. Когда сдвигъ великъ, треугольникъ *a B b* приметъ форму, показанную на фиг. 133. такъ какъ, если сдвигъ пропорціоналенъ *R tang* β и *R* мало, то *tang* β долженъ быть великъ и уголъ β близокъ къ 90°. Поле *a* ограничено, на основаніи раньше высказанныхъ соображеній, такъ что моментъ вращенія (изображаемый площадью треугольника) будетъ очень малъ. При увеличеніи *R* мы необходимо уменьшаемъ *tang* β, и дѣлаемъ этимъ *B* и площадь бо́льшими, т. е., получая большій начальный моментъ вращенія. Такимъ образомъ введеніе въ цѣпь ротора при пусканіи въ ходъ двигателя дополнительнаго сопротивленія безъ самоиндукціи позволяетъ двигателю развить при началѣ движенія бо́льшій моментъ.

Фиг. 133.



5. Связь между моментомъ вращенія и сдвигомъ.

Съ цѣлью найти связь между моментомъ вращенія, сдвигомъ и сопротивленіемъ ротора, замѣтимъ, что изъ чертежа 132 можно заключить:

$$b = a \sin \beta$$

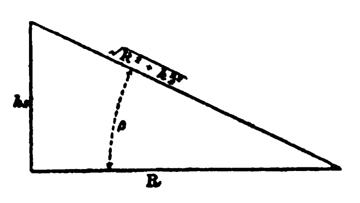
$$B = a \cos \beta$$

Далѣе изъ уравненія

$$\text{сдвигъ} = \frac{b}{B} \times \frac{R}{k}$$

Поэтому, мѣняя масштабъ фиг. 132, мы можемъ переименовать стороны треугольника, какъ это показано на фиг. 134, гдѣ черезъ s обозначенъ сдвигъ.

Фиг. 134.



Изъ этого треугольника можемъ вывести, что

$$Sin \beta = \frac{Ks}{\sqrt{R^2 + k^2 s^2}}$$

$$Cos \beta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + k^2 s^2}}$$

Моментъ вращенія, пропорціональный $b \times B$, будетъ пропорціоналенъ $a^2 \sin\beta \cos\beta$, слѣдовательно онъ равенъ

$$T = \frac{a^2 ksR}{R^2 + k^2 s^2}.$$

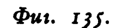
Обозначая произведеніе $a^2 k$ черезъ q, гдѣ слѣдовательно q будетъ постоянная зависящая отъ конструкціи двигателя, получимъ:

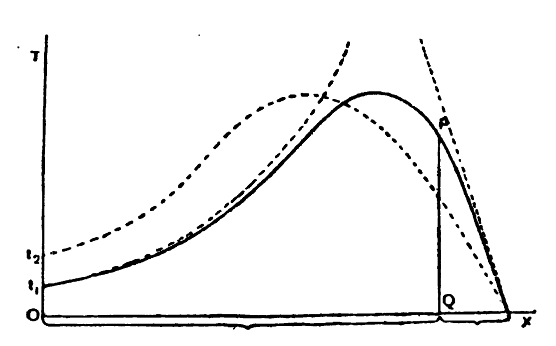
$$T = q \frac{sR}{R^2 + k^2 s^2}.$$

Тутъ мы предполагали, что a, т. е. напряженіе поля, созданнаго первичной обмоткой, постоянно (см. стр. 135).

Если мы желаемъ изслѣдовать графически, что значитъ предъидущее уравненіе, то мы можемъ, принявъ для R какое нибудь опредѣленное значеніе, построить кривую для зависимости между T и s.

Пусть прямая OX (фиг. 135) изображаетъ скорость вращенія магнитнаго поля. Отложимъ на ней длину OQ, которая


Фиг. 135.



пусть изображаетъ скорость двигателя. Тогда остаточный отрѣзокъ QX изобразитъ сдвигъ. Такое построеніе эквивалетно откладыванію величины сдвига отъ точки X по направленію къ точкѣ O. Будемъ, далѣе, по ординатамъ откладывать величины момента вращенія T, вычисленныя на основаніи предыдущаго уравненія. Такъ, когда $s = QX$, T будетъ равно QP. Откладывая величины T для всѣхъ точекъ прямой OX, начиная отъ X, когда $s = 0$, получимъ кривую XPt_1, быстро подымающуюся вверхъ, доходящую до максимума и затѣмъ спускающуюся вновь къ точкѣ t_1. Величина Ot_1 есть начальный моментъ вращенія. Моментъ будетъ наибольшій, когда $\beta = 45°$. Замѣтимъ, что круто-подымающаяся часть кривой почти прямая, такъ какъ она ассимптоматически приближается къ прямой, которая представляла бы зависимость между моментами вращенія и скоростью, если бы магнитное поле было постоянно и не было бы магнитной утечки. Дѣйствительно, эта линія соотвѣтствуетъ уравненію $T = b\,(\Omega - \omega)$, выведенному на стр. 153. Если мы въ полученномъ теперь уравненіи будемъ считать s весьма малымъ сравнительно съ R, то это уравненіе можно переписать такъ:

$$T = q\ {}^{s}/_{R}.$$

Другой конецъ, кривой гдѣ сдвигъ великъ, имѣетъ вогнутую форму. Приблизительно уравненіе этой части кривой получимъ,

если положимъ s весьма большимъ сравнительно R, т. е. будемъ считать, что R^2 очень мало сравнительно съ s. Въ этомъ случаѣ наше уравненіе можно будетъ переписать такъ:

$$T = q\ {}^{s}/_{R}.$$

Это будетъ уравненіе гиперболы (изображенной на фиг. 135 пунктиромъ). Когда двигатель стоитъ $s = \Omega$, слѣд. при OQ=о, величина $T = q\frac{R}{\Omega}$, другими словами при *началѣ движенія* моментъ вращенія пропорціоналенъ сопротивленію ротора.

Если мы теперь дадимъ R другое значеніе, большее предыдущаго, и построимъ новую кривую, то получимъ линію, тоже подымающуюся отъ X, достигающую того же максимума (той же высоты), что и первыя и затѣмъ опускающуюся, но уже до точки t_2. Эта кривая представлена на черт. 135 пунктиромъ. Такимъ образомъ введеніе сопротивленія увеличиваетъ начальный моментъ вращенія, но вмѣстѣ съ тѣмъ оно заставляетъ наибольшій моментъ развиваться при большей величинѣ сдвига. Двигатель доставляетъ то же количество энергіи, что и прежде, но работаетъ при большой разности скоростей при слабой и полной нагрузкѣ. Кромѣ того, отдача при полной нагрузкѣ уменьшается. Если при сдвигѣ въ 5% и отдачѣ въ 95% мы не получаемъ достаточнаго начальнаго момента, то мы можемъ увеличить его помощью введенія сопротивленія и довольствуясь (при полной нагрузкѣ) отдачей въ 90% при сдвигѣ въ 10%. Теперь становится понятной причина, почему въ современныхъ двигателяхъ устраивается приспособленіе, позволяющее включать въ цѣпь ротора сопротивленіе при пусканіи въ ходъ и выключать его немедленно, какъ только роторъ приметъ нужную скорость.

Въ различныхъ теоріяхъ двигателей съ вращающимся полемъ *), этотъ вопросъ разсматривается съ различныхъ сто-

---

*) L. Duncan *«Alternate Current Motors»* Electr. World (N. J.) XVII, 341, 357. Hutin et Leblanc *«La Lumière Èlectrique»* XI, 373.

Dr. Sahulka *«Ueber Wechselstrom-Motoren mit Magnetischen Drehfelde»* Leipzig 1892.

K. V. Picou *«Les Moteurs électriques à champ magnetique tournant»* Paris 1892.

ронъ, но при помощи какихъ математическихъ выкладокъ его бы не получали, выраженіе для момента вращенія всегда имѣетъ видъ

$$T = q \frac{sR}{R^2 + k^2 s^2}.$$

Примѣненный нами способъ вывода этой формулы, хотя и не полный, такъ какъ въ немъ не введены знаки для всѣхъ имѣющихъ значеніе величинъ, можетъ быть имѣетъ то преимущество, что въ немъ ясно принятъ во вниманіе главный принципъ, и что онъ позволяетъ легко слѣдить за физическимъ значеніемъ математическихъ выраженій.

Величина k, какъ легко вспомнить, есть постоянная, зависящая отъ магнитнаго сопротивленія магнитной цѣпи и числа оборотовъ въ обмоткѣ ротора. Это на самомъ дѣлѣ величина самоиндукціи одного полного витка провода въ двигателѣ. Величина q заключаетъ въ себѣ величину a^2 и общее число витковъ проволоки въ роторѣ. Сравнивая полученную нами формулу съ формулами, полученными другими авторами, надо помнить, что s есть угловая скорость, равная $2\pi(n-n_2)$.

Штейнмецъ даетъ слѣдующую формулу для вычисленія момента вращенія въ фунтахъ при радіусѣ въ 1 футъ:

$$T = \frac{fe^2 g^2 sR}{R^2 + k^2 s^2}.$$

Въ этой формулѣ всѣ буквы имѣютъ то же значеніе, что и въ нашей формулѣ; g—есть отношеніе между числомъ оборотовъ во вторичной и въ первичной цѣпяхъ величина же f:

$$f = \frac{550}{746\ \pi p n}$$

гдѣ p—число полюсовъ, а n—частота. Теорія Штейнмеца очень полна въ томъ отношеніи, что въ ней принимаются во вниманіе

S. Arnold *«Theorie und Berechnung der asynchronen Wechselstrom Motoren»* и статьи того же автора въ Electr. World (N. J.) 1893—1894.

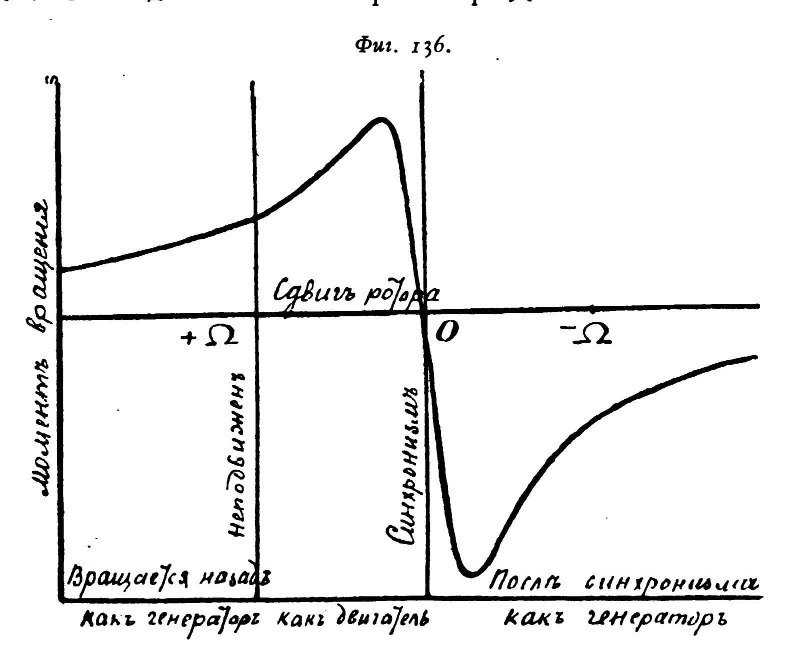
G. Ferraris *«A Metod for the Treatement of Rotating or Alternatin Vectors»* Electrician 1897 XXXIII, 110, 129, 152, 184.

Reber *«Theory of two ond three-phase Motors»* Amer. Inst. Electr. Engineers. Oct. 1894.

Steinmetz. Anrerican Inst. Electr. Engineers, Deç. 1894 p. 803.

и утечка и гистерезисъ и дается величина обратной электродвижущей силы e въ проводникахъ статора въ функціи отъ числа вольтъ у зажимовъ и другого выраженія, заключающаго эти величины. Откладывая величины момента T при разныхъ сдвигахъ, Штейнмецъ получаетъ кривую, представленную на фиг. 136, которая имѣетъ тотъ же характеръ, что и кривая фиг. 135, но только продолженная въ обѣ стороны. Если увеличить механически скорость двигателя за синхронизмъ, то моментъ вращенія станетъ отрицательнымъ и машина будетъ работать какъ генераторъ, давая нижнюю часть кривой (см. стр. 45). Если же начать вращать двигатель въ направленіи, противуположномъ направленію вращенія поля, моментъ вращенія начнетъ убывать, какъ это видно на лѣвой сторонѣ чертежа.

Фиг. 136.

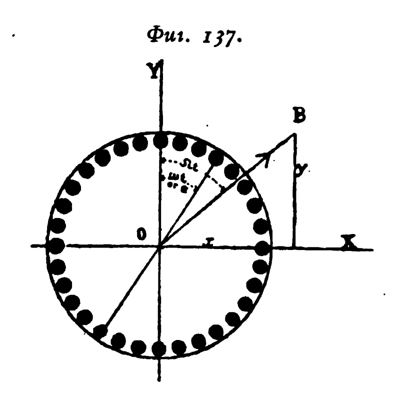


ГЛАВА VII.

Аналитическая теорія многофазныхъ двигателей.

Предлагаемый здѣсь способъ изложенія теоріи многофазныхъ двигателей представляетъ собою нѣсколько измѣненный способъ Потье *). Вмѣсто того, чтобы разсматривать вращающееся поле, какъ постоянный потокъ, пронизывающій вращающійся роторъ, мы можемъ разложить его на два перемѣнныхъ потока, направленныхъ по осямъ OX и OY (фиг. 137), расположеннымъ подъ прямымъ угломъ; тогда всѣ движенія ротора, потоки и токи можно относить къ этимъ общимъ осямъ.

Фиг. 137.



Пусть прямая OB изображаетъ направленіе и величину вращающагося магнитнаго потока (т. е. потока, получающагося отъ сложенія потоковъ, созданныхъ токомъ въ статорѣ и токомъ въ роторѣ) въ какой нибудь моментъ. Тогда x и y изобразятъ величины и направленія горизонтальной и вертикальной составляющихъ въ тотъ же моментъ.

Если поле вращается съ равномѣрной скоростью въ Ω ра-

---

*) *A. Potier* „Sur les moteurs, à induit fermé sur lui même“. Bull. de la Soc. Internationale des Electriciens, Mai 1897, p. 248.

діановъ въ секунду и остается все время постояннымъ по напряженію, то:

$$x = x_m \, Sin \, \Omega \, t$$

и

$$y = y_m \, Cos \, \Omega \, t \, ,$$

гдѣ x_m и y_m суть наибольшія значенія горизонтальной и вертикальной составляющихъ, дающіе величину вращающагося потока.

Если, однако, мы хотимъ разсуждать возможно общѣе и включить въ наше разсужденіе также случай эллиптически вращающихся полей, подобныхъ встрѣчающимся въ однофазныхъ двигателяхъ, то мы должны написать:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_m \, Sin \, \Omega \, t \\ y &= y_m \, Sin \, (\Omega t + \varphi), \end{aligned} \right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

гдѣ x_m и y_m уже могутъ быть и не равны.

Сначала мы и разсмотримъ этотъ общій случай.

Положимъ, что обмотка ротора состоитъ изъ Z стержней Ее можно всегда разсматривать, какъ состоящую изъ $\frac{Z}{2}$ витковъ, намотанныхъ какъ въ барабанныхъ арматурахъ, причемъ каждый оборотъ имѣетъ нѣкоторое сопротивленіе r.

Если роторъ вращается съ скоростью ω радіановъ въ секунду, то уголъ составляемый плоскостью какого нибудь одного витка съ вертикальной плоскостью будетъ $\omega \, t$ (см. фиг. 137).

Потокъ сквозь этотъ витокъ будетъ $x \, Cos \, \omega \, t - y \, Sin \, \omega \, t$. Электродвижущая сила въ виткѣ будетъ образовываться одновременно какъ вслѣдствіе того, что мѣняется его наклонъ относисительно полей x и y такъ и вслѣдствіе того, что x и y мѣняютъ свои величины.

Напишемъ производную отъ выраженія потока по t и получимъ такимъ образомъ величину мгновенной электродвижущей силы:

$$e = - x \, \omega \, Sin \, \omega \, t - y \, \omega \, Cos \, \omega \, t + x' \, Cos \, \omega t - y' \, Sin \, \omega \, t$$

или

$$e = Cos \, \omega \, t \, (x' - y \, \omega) - Sin \, \omega \, t \, (y' + x \, \omega) = c \, r \, . \quad . \quad . \quad (2)$$

гдѣ c есть сила тока въ виткѣ.

Чтобы получить выраженіе для момента вращенія производимаго всѣми витками, нужно просуммировать выраженіе для мо-

мента, производимаго однимъ виткомъ, въ предѣлахъ половины оборота. Для этого удобнѣе обозначить черезъ a уголъ, который какой нибудь опредѣленный витокъ составляетъ съ осью Y. Тогда моментъ вращенія, производимый однимъ виткомъ будетъ:

$$c\,(y \, Cos\, a + x \, Sin\, a)\,.$$

Подставляя сюда величину c, взятую изъ предыдущаго выраженія, и интегрируя въ предѣлахъ $a = 0$ и $a = \pi$, припоминая при этомъ, что въ углѣ a заключается $\frac{Z}{2}$ витковъ, такъ что:

$$\Sigma \, Sin^2 \, a = \Sigma \, Cos^2 \, a = \frac{Z}{4}$$

и

$$\Sigma \, Sin\, a \, Cos\, a = 0\,,$$

получимъ слѣдующее выраженіе для момента вращенія:

$$T \text{ (въ нѣкотор. моментъ)} = \frac{Z}{4r}\,[y\,(x' - y\,\omega) - x\,(y' + x\,\omega)]\,.$$

Для общаго случая, когда $x = x_m \, Sin \, \Omega\, t$ и $y = y_m \, Sin\,(\Omega\, t + \varphi)$, мы получимъ выраженіе для средней величины момента вращенія, если подставимъ вмѣсто x, y, x' и y' соотвѣтственныя величины, проинтегрируемъ въ предѣлахъ $\Omega\, t = 0$ и $\Omega\, t = 2\,\pi$ и затѣмъ раздѣлимъ на 2π. Тогда окажется:

$$\text{Средній моментъ вращенія} = \frac{1}{2}\frac{Z}{4r}[2x_m y_m \Omega \, Sin \varphi - \omega(x^2{}_m + y^2{}_m)]\,. \quad (3)$$

Это общее выраженіе для момента вращенія годится для всякаго многофазнаго двигателя съ эллиптическимъ вращающимся полемъ. Если поле вращается съ постоянной скоростью и сохраняетъ постоянное напряженіе, такъ что $\varphi = 90°$ и $y_m = x_m$, то выраженіе для момента принимаетъ болѣе простой видъ, именно:

$$\frac{Z}{4r} x^2{}_m \; (\Omega - \omega)$$

Если статоръ обыкновеннаго типа, подобнаго изображенному на фиг. 105, такъ что магнитное сопротивленіе магнитной цѣпи практически не зависитъ отъ направленія поля, то выраженія для составляющихъ по x и y для поперечнаго намагниченія, производимаго токами въ роторѣ, будутъ весьма просты. Именно, если мы обозначимъ черезъ F потокъ перпендикулярный къ плоскости какого нибудь витка, производимый токомъ силы равной единицѣ,

проходящимъ по этому витку, то составляющія x_1 и y_1 поперечнаго поля будутъ:

$$x_1 = -F \; \Sigma \, c \, Cos \, a.$$
$$y_1 = \quad F \; \Sigma \, c \, Sin \, a.$$

Подставляя сюда вмѣсто c его величину

$$\frac{1}{r} \left[(x' - y\,\omega) \, Cos \, a - (y' + x\,\omega) \, Sin \, a \right].$$

И интегрируя въ предѣлахъ $a = 0$ и $a = \pi$, чтобы включить всѣ витки, получимъ:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= -\frac{ZF}{4r} (x' - y\,\omega) \\ y_1 &= -\frac{ZF}{4r} (y' + x\,\omega) \end{aligned} \right\} \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (4)$$

Обозначимъ величину $\frac{ZP}{4r}$ черезъ $\frac{1}{u}$, тогда получимъ:

$$u x_1 = -(x' - y\omega),$$
$$u y_1 = -(y' + x\omega).$$

Чтобы найти составляющія поля созданнаго статоромъ, достаточно вычесть составляющія поперечнаго поля изъ составляющихъ результирующаго поля. Поэтому, если мы назовемъ черезъ Φ_x и Φ_y слагающія искомаго поля вдоль по осямъ X и Y, то получимъ:

$$\Phi_x = x - x_1$$
$$\Phi_y = y - y_1$$

или

$$\left. \begin{aligned} u\,\Phi_x &= ux + x' - y\omega \\ u\,\Phi_y &= uy + y' + x\omega \end{aligned} \right\} \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; (5)$$

Зная составляющія Φ_x и Φ_y, мы можемъ найти изъ этихъ уравненій составляющія x и y и наоборотъ.

Примѣнимъ теперь эти формулы къ случаю простого двигателя, составляющія вращающагося поля въ которомъ равны:

$$x_m \, Sin \, \Omega \, t \text{ и } x_m \, Cos \, \Omega \, t.$$

На основаніи ур. (5) мы можемъ написать:

$$u\,\Phi_x = u\,x_m \, Sin \, \Omega \, t + x_m \, \Omega \, Cos \, \Omega \, t - \omega \, x_m \, Cos \, \Omega \, t.$$

Откуда получимъ составляющую поля, создаваемаго статоромъ, вдоль по оси X. Именно:

$$\Phi_x = \frac{\sqrt{u^2 + (\Omega - \omega)^2}}{u} x_m \, Sin\,(\Omega t - \beta),$$

гдѣ

$$\beta = arctang\,\frac{\Omega - \omega}{u}.$$

Составляющая по оси Y будетъ имѣть подобное же выраженіе, но вмѣсто *Sin* въ него войдетъ *Cos* угла.

Моментъ вращенія, какъ мы видѣли на стр. 166, равняется:

$$\frac{Z}{4r} x^2_m (\Omega - \omega).$$

Чтобы получить мощность, развиваемую двигателемъ, надо умножить этотъ моментъ на угловую скорость ω. Получимъ:

$$P = \frac{Z}{4r} x_m{}^2 \omega (\Omega - \omega).$$

Опредѣлимъ теперь количество тепла, развивающагося въ роторѣ. Въ одномъ виткѣ тепло образуется со скоростью rc^2 джулей въ секунду. Подставляя сюда величину c и интегрируя, какъ мы это дѣлали раньше, для распространенія на всѣ витки, получимъ для каждаго момента:

$$\frac{Z}{4r}[(x' - y\omega)^2 + (y' + x\omega)^2].$$

Распространивъ это выраженіе на полный періодъ, можемъ вычислить количество тепла, развивающагося въ секунду. Именно:

$$H\,(\text{тепло въ секунду}) = \frac{1}{2}\,\frac{Z}{4r}[(x^2 + y^2)(\Omega^2 + \omega^2) - 4 x_m y_m \Omega\omega Sin\varphi]$$

Въ случаѣ равномѣрно вращающагося поля $x_m = y_m$ и $Sin\,\varphi = 1$, такъ что:

$$H = \frac{Z}{4r} x^2_m (\Omega - \omega)^2.$$

Отсюда:

$$P + H = \frac{Z}{4r} x^2_m \,[(\Omega - \omega)^2 + \omega(\Omega - \omega)]$$

и отдача двигателя будетъ:

$$\frac{P}{P + H} = \frac{\omega}{\Omega}$$

результатъ, полученный нами уже раньше на основаніи совершенно иныхъ соображеній (см. стр. 152).

Разсматривая далѣе потери въ двухполюсномъ статорѣ, мы будемъ обозначать черезъ Z_1 число дѣйствующихъ проводниковъ въ немъ $\left(\text{такъ что число ихъ въ одной катушкѣ будетъ } \frac{Z_1}{4}\right)$ и черезъ R общее ихъ сопротивленіе, когда всѣ они соединены послѣдовательно. Разность потенціаловъ у зажимовъ одной цѣпи, напр., производящей горизонтальный потокъ (предполагаемъ, что соединенія въ стоторѣ сдѣланы какъ показано на фиг. 49), можно найти слѣдующимъ образомъ:

Мы видѣли, что горизонтальный потокъ, созданный статоромъ, равенъ:

$$\frac{\sqrt{u^2+(\Omega-\omega)^2}}{u}\, x_m \, Sin\,(\Omega t-\beta)\,.$$

Съ другой стороны онъ долженъ равняться:

$$\frac{Z_1\,F}{4}\,c_1$$

гдѣ c_1 есть сила тока въ катушкѣ статора. Изъ этихъ двухъ выраженій получаемъ:

$$c_1=\frac{4F}{Z_1}\times\frac{\sqrt{u^2+(\Omega-\omega)^2}}{u}\, x_m \, Sin\,(\Omega t-\beta).$$

Разность потенціаловъ у зажимовъ одной изъ цѣпей въ нѣкоторый моментъ равна:

$$e_1=\frac{R}{2}\,c_1+\frac{Z_1}{4}\,x'.$$

Подставляя сюда величины, c_1 и x' и обозначая черезъ λ выраженіе $\frac{R}{Z_1^2}\cdot\frac{Z}{r}$, получимъ:

$$e_1=\frac{Z_1}{4}\,x_m\,\Omega\left[2\lambda\frac{u}{\Omega}\,Sin\,\omega\,t+\left(1+2\lambda\frac{\Omega-\omega}{\Omega}\right)Cos\,\Omega\,t\right]$$

Мы можемъ переписать это выраженіе въ видѣ:

$$e_1=e_m Sin\,(\Omega\,t-\gamma),$$

гдѣ

$$tang\,\gamma=\frac{\Omega-\omega}{\omega}+\frac{\Omega}{2\lambda u}\,.$$

Отставаніе тока было β, гдѣ $\tan \beta = \frac{\Omega - \omega}{\omega}$, поэтому разность фазъ между токомъ и электродвижущей силой, которую мы обозначимъ черезъ φ_1 будетъ такова, что:

$$\tan \varphi_1 = \frac{u\,\Omega}{\Omega(\Omega - \omega) + 2\lambda u^2 + (\Omega - \omega)^2}.$$

Количество тепла, выдѣляющееся въ статорѣ въ секунду будетъ:

$$H_1 = R c_1^2 = \frac{1}{2} R\, \Phi_m^2 \left(\frac{4}{Z_1 F}\right)^2 =$$

$$= \frac{1}{2} \frac{R}{Z_1^2} \cdot \frac{Z}{r} \left(\frac{4r}{ZF}\right)^2 \frac{Z}{r} \Phi^2_m = \frac{1}{2} \lambda u^2 \Phi_m \frac{Z}{r}.$$

Подставляя сюда величину Φ_m, получимъ:

$$H_1 = \frac{Z}{4r} x^2_m\, 2\lambda [u + (\Omega - \omega)^2].$$

Положимъ теперь:

$$\frac{Z}{4r} x^2_m = K.$$

Тогда всѣ получснныя нами формулы можно будетъ переписать такъ:

Моментъ вращенія . . . . $T = K(\Omega - \omega)$
Мощность . . . . $P = K\omega(\Omega - \omega)$
Колич. тепла въ роторѣ. . . . . $H = K(\Omega - \omega)^2$
» » » статорѣ . . . . $H = K\, 2\lambda\, [u^2 + (\Omega - \omega)^2]$.

Наибольшая величина обратной электродвижущей силы въ одной изъ цѣпей двухфазнаго статора, будетъ приблизительно:

$$E_m = \frac{Z_1}{4} x_m \Omega \left(1 + 2\lambda \frac{\Omega - \omega}{\omega}\right).$$

Наибольшая величина силы тока въ статорѣ, когда двигатель работаетъ при нормальной нагрузкѣ:

$$c_1 = \frac{4F}{Z_1} \frac{\sqrt{u^2 + (\Omega - \omega)^2}}{u} x_m.$$

Разность фазъ уже дана выше.

При всѣхъ предыдущихъ выводахъ предполагалось, что весь потокъ пронизывающій роторъ пересѣкаетъ и проводники ста-

тора. Это предположеніе при работѣ съ нормальной нагрузкой весьма близко къ истинѣ, но при началѣ движенія, какъ мы уже показали на стр. 158, это не такъ: значительная часть потоковъ, какъ статора, такъ и ротора, замыкается отдѣльно, по независимымъ путямъ.

Чтобы сдѣлать теорію примѣнимой для всѣхъ скоростей и нагрузокъ, нужно принимать во вниманіе сомоиндукціи каждой цѣпи, а также и взаимную индукцію. Выраженія, содержащія всѣ эти величины становятся столь сложными, что никакой практической пользы они принести не могутъ, даже, если всѣ входящія въ нихъ величины будутъ опредѣлены. Поэтому авторъ думаетъ, что элементарная теорія, изложенная въ главѣ VI и тѣ указанія на способы аналитическаго изученія вопроса, которыя содержаться въ настоящей главѣ, будутъ для изучающихъ гораздо полезнѣе, чѣмъ болѣе сложныя теоріи, литература которыхъ указана на стр. 161.

ГЛАВА VIII.

Однофазные двигатели.

Двигатели, предназначенные для работы съ однофазными, т. е. съ обыкновенными перемѣнными токами, очевидно, имѣютъ то преимущество, что они требуютъ для своего питанія только двухъ проводовъ, а не трехъ или четырехъ, и кромѣ того, что они могутъ питаться просто отъ освѣтительныхъ проводовъ съ перемѣннымъ токомъ, имѣющихся уже во многихъ городахъ.

До изобрѣтенія многофазныхъ двигателей, единственные употреблявшіеся двигатели перемѣннаго тока были обыкновенныя машины перемѣннаго тока (построѐнныя совершенно такъ же, какъ генераторы), съ постороннимъ возбужденіемъ индукторовъ. Они вращались совершенно синхронично и въ движеніе сами не приходили. Но послѣ того какъ многофазные асинхронные двигатели начали съ успѣхомъ примѣняться на практикѣ, стало ясно, что подобнымъ же образомъ можно строить и однофазные двигатели.

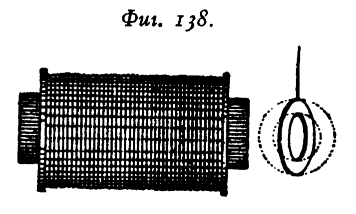
Перемѣнный токъ, проходя по какой нибудь группѣ катушекъ многофазнаго двигателя, производитъ потокъ, пронизывающій роторъ по нѣкоторому опредѣленному пути.

Этотъ потокъ увеличивается до максимума, затѣмъ падаетъ до нуля, мѣняетъ знакъ, опять увеличивается до отрицательнаго максимума и т. д., но направленіе его не мѣняется, какъ во вращающемся полѣ. Въ стержняхъ ротора, пронизываемыхъ потокомъ будутъ образовываться очень сильные токи, но стремленіе двигаться въ ту или другую сторону они не получатъ совер-

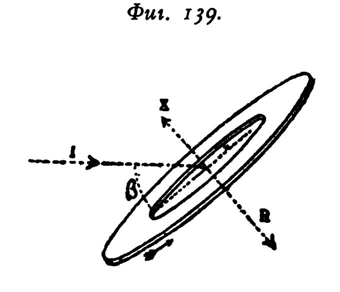
шенно такъ же какъ паровая машина съ однимъ цилиндромъ, въ которой силы гармоническія и прямолинейныя и которую, если мотыль стоитъ на мертвой точкѣ, нѣтъ никакой возможности привести въ движеніе безъ помощи посторонней силы, которая нарушила бы равновѣсіе. Разъ роторъ придетъ въ движеніе, онъ уже будетъ продолжать вращаться, увеличивая скорость, пока не будетъ приблизительно достигнутъ синхронизмъ, и будетъ производить большой моментъ вращенія. Причина этого выяснится при изученіи теоріи однофазныхъ двигателей, къ изложенію которой мы сейчасъ перейдемъ.

Если мы возьмемъ соленоидъ (фиг. 138) съ пучкомъ желѣзной проволоки въ качествѣ сердечника и пропустимъ черезъ него перемѣнный токъ, то получимъ простое перемѣнное поле. Если мы въ этомъ полѣ подвѣсимъ мѣдное кольцо, какъ показано на фиг. 138, то увидимъ, что кольцо будетъ стремиться *) повернуться и помѣститься такъ, чтобы его плоскость стала параллельна потоку, т. е. такъ, чтобы его не пронизывали вовсе магнитныя линіи. Однако стремленіе повернуться замѣчается въ кольцѣ только тогда, когда оно помѣщено наискось относительно потока; если же его плоскость перпендикулярна къ направленію потока, то оно остается неподвижно. Если же, хотя немного повернуть его влѣво или вправо, то оно сейчасъ же повернется такъ что его плоскость станетъ параллельно магнитнымъ линіямъ. Пусть β (фиг. 139) будетъ уголъ между плоскостью кольца и направленіемъ магнитнаго поля. Электродвижущая сила, а слѣдовательно и токъ, индуктируемый въ кольцѣ вслѣдствіе измѣненій напряженія поля, будутъ пропор-

Фиг. 138.



Фиг. 139.



*) См. *Elihu Thomson* „Novel Phenomena of Alternating currents“ *Electr. World* (N. J.) May 28, 1887.



ціональны *Sin* β. Далѣе вращающій моментъ, дѣйствующій на кольцо, пропорціоналенъ силѣ тока въ немъ, напряженію поля и косинусу угла β. Слѣдовательно онъ пропорціоналенъ произведенію *Sin* β *Cos* β. Стремленіе вращаться равно нулю, когда уголъ β равенъ или 0^0 или 90^0, въ первомъ случаѣ потому, что въ немъ нѣтъ тока, во второмъ потому, что длина плеча пары равна нулю. Стремленіе это максимально при $\beta = 45^0$.

Однако и въ этомъ положеніи не было бы вращающей пары если бы не было отставанія токовъ въ кольцѣ, такъ какъ фаза индуктируемой электродвижущей силы находится въ квадратурѣ относительно фазы поля. Когда поле имѣетъ наибольшее напряженіе, электродвижущей силы нѣтъ, когда же электродвижущая сила достигнетъ максимума, напряженіе поля станетъ равнымъ нулю. Но если кольцо обладаетъ самоиндукціей, заставляющей токъ отставать, то появляется замѣтный вращающій моментъ, стремящійся уменьшить β. Наибольшій моментъ вращенія получится въ случаѣ, когда самоиндукція и сопротивленіе кольца таковы, по отношенію къ частотѣ тока, что $2\pi nL = r$ или когда уголъ отставанія тока въ кольцѣ равенъ 45^0.

Это явленіе можетъ быть объяснено слѣдующимъ образомъ: токъ индуктированный въ кольцѣ производитъ поперечное поле, которое, не совпадая по фазѣ съ полемъ, созданнымъ первичнымъ перемѣннымъ токомъ, и будучи наклонно къ нему, создаетъ вмѣстѣ съ нимъ вращающееся поле. Послѣднее, дѣйствуя на кольцо, производитъ вращающій моментъ.

Болѣе точно разобрать, что происходитъ въ разсматриваемомъ случаѣ, можно слѣдующимъ образомъ *). Положимъ, что кольцо наклонено подъ угломъ β къ направленію поля, созданнаго соленоидомъ. Потокъ въ дѣйствительности пронизывающій кольцо будетъ зависѣть: 1) отъ составляющей производимой полемъ соленоида нормальной къ плоскости кольца и 2) отъ поперечнаго потока, производимаго токами, циркулирующими въ кольцѣ. Полу-

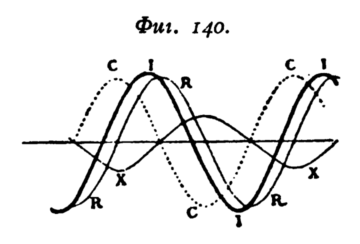
---

*) Полный аналитическій разборъ этого вопроса можно найти: *T. Walker* „Repulsion and Rotation producet by Alternating currents“ *Phil. Trans. R. S.* 1892, A, 279; *I. A. Fleming* „On Electromagnetic Repulsion“ *Proc. Royal. Instit.* XIII, 296 March 6, 1891 и Journ. of the Soc. of Arts. May. 14, 1890.



чающійся потокъ будетъ измѣняться по закону синусовъ и можетъ быть изображенъ кривой *RR* (фиг. 140). Токи въ кольцѣ будутъ отличаться отъ поля по фазѣ на прямой уголъ, и могутъ быть изображены кривой *CC*. Ихъ положительное направленіе указано стрѣлкой на фиг. 139. Поперечное поле изобразится тогда кривой *xx*, и нормальная составляющая поля соленоида изобразится кривой *II*,

Фиг. 140.



получаемой вычитаніемъ ординатъ кривой *xx* изъ соотвѣтствующихъ ординатъ кривой *RR*. Поле, произведенное соленоидомъ, конечно пропорціональное его нормальной слагающей, какъ видно, немногимъ разнится по фазѣ отъ тока, такъ что ихъ произведеніе по большей части положительно. Примѣняя правило Флеминга къ фиг. 139, увидимъ, что моментъ вращенія направленъ такъ, что онъ стремится уменьшать уголъ β.

Э. Томсонъ бралъ обыкновенную арматуру постояннаго тока, и помѣщалъ ее въ перемѣнное поле, наклонно относительно его направленія, предварительно замкнувъ ея щетки на себя. Арматура приходила въ движеніе и вращалась, производя значительный моментъ вращенія. Проводники арматуры дѣйствовали здѣсь совершенно такъ же, какъ помѣщенное наискось кольцо, разница была только та, что наклонное положеніе при помощи щетокъ и коллектора, сохранялось постоянно несмотря на вращеніе арматуры, и такимъ образомъ это вращеніе поддерживалось постоянно (см. стр. 192).

Стремленіе проводника выйти изъ наклоннаго положенія примѣнено Томсономъ (стр. 192) для пусканія въ ходъ однофазныхъ двигателей.

Способъ, который обыкновенно примѣняютъ для пусканія въ ходъ однофазнаго двигателя, состоитъ въ наложеніи на перемѣнное поле другого наклоннаго, разнящагося отъ перваго по фазѣ. Это наложеніе чаще всего дѣлается помощью устройства на статорѣ добавочныхъ обмотокъ, питаемыхъ токомъ, не совпадающимъ по фазѣ съ токомъ въ главныхъ обмоткахъ, для чего надо имѣть приспособленіе, которое позволяло бы получать эту

разность фазъ въ обоихъ вѣтвяхъ. Это *сдвиженіе* фазъ можетъ быть произведено различными способами. Мы уже видѣли (на стр. 14), что въ цѣпяхъ съ сопротивленіемъ R и самоиндукціей L тангенсъ угла отставанія фазы тока отъ фазы электродвижущей силы равняется $\frac{pL}{R}$. Поэтому, если въ одной изъ вѣтвей будетъ сравнительно большая самоиндукція, а въ другой сравнительно большое сопротивленіе, то фазы токовъ въ этихъ вѣтвяхъ будутъ разниться почти на 90°. Разницу въ коэффиціентахъ самоиндукціи въ обѣихъ цѣпяхъ можно образовать или дѣлая обмотки статора изъ разнаго числа оборотовъ, какъ это сдѣлано въ двигателѣ Тесла (фиг. 101), или же включая послѣдовательно въ одну изъ вѣтвей добавочную катушку съ желѣзнымъ сердечникомъ. Въ другую вѣтвь можно ввести сопротивленіе безъ самоиндукціи.

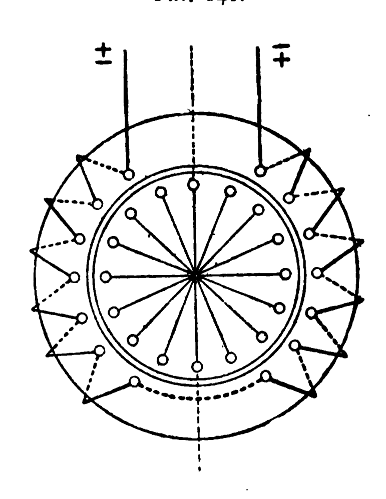
Разность фазъ можно также образовать, снабжая, при помощи конденсаторовъ, одну изъ вѣтвей нѣкоторой емкостью, такъ какъ емкость имѣетъ способность передвигать фазу тока впередъ. Для этой цѣли чаще всего примѣняютъ электролитическіе конденсаторы, состоящіе изъ нѣсколькихъ желѣзныхъ пластинъ, погруженныхъ въ растворъ соды.

Есть также нѣсколько способовъ производить разность фазъ при помощи особыхъ трансформаторовъ. Они разсмотрѣны подъ именемъ *трансформаторовъ фазъ* въ главѣ IX.

Простой однофазный двигатель съ замкнутой на себѣ обмоткой ротора былъ описанъ въ патентѣ, выданномъ англійскимъ Patent office въ ноябрѣ 1892 г. (№ 20505) Цюрихскому заводу Эрликонъ. Вотъ какъ тамъ изложена причина, почему въ двигателѣ, послѣ того, какъ онъ придетъ въ движеніе, будетъ существовать вращающее усиліе: «Послѣ того, какъ машинѣ будетъ сообщено какимъ нибудь образомъ вращательное движеніе, въ тѣхъ проводникахъ арматуры, которые приближаются къ одному изъ полюсовъ возбуждающей обмотки и удаляются отъ сосѣдняго полюса, противнаго знака индуктируются токи. Эти токи будутъ слабѣе отталкиваться первымъ полюсомъ, чѣмъ вторымъ, такъ какъ, вслѣдствіе вращенія, данный проводникъ будетъ имѣть фазу, которая при положеніи покоя была бы въ другомъ проводникѣ помѣщенномъ нѣсколько позади. Схематическій рису-

нокъ двухполюснаго двигателя представленъ на фиг. 141. Обмотки статора устроены такъ, что они образуютъ два послѣдовательныхъ полюса вверху и внизу кольца. Въ названномъ патентѣ описанъ также и способъ пусканія въ ходъ двигателя при помощи добавочныхъ обмотокъ на статорѣ, по которымъ пропускается токъ разнящійся по фазѣ отъ главнаго. Способъ полученія этой разности фазъ изображенъ на фиг. 164.

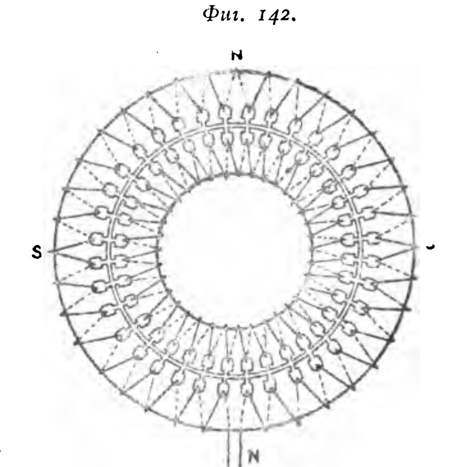
Фиг. 141.



Въ патентѣ № 23902, выданномъ Броуну въ декабрѣ 1892 г., описано нѣсколько однофазныхъ индукціонныхъ двигателей, имѣющихъ роторы въ видѣ бѣличьей клѣтки *).

Послѣ этого времени обѣими поименованными фирмами было построено много однофазныхъ двигателей. Главнѣйшая разница въ ихъ конструкціи заключается въ принятыхъ приспособленіяхъ для пусканія въ ходъ и въ примѣненіи зубчатыхъ сердечниковъ, вмѣсто сердечниковъ съ каналами. Споръ о пріоритетѣ **), возникшій между этими фирмами въ 1893 г., насъ не касается. Повидимому онъ законченъ письмомъ Броуна въ *Electrotechnische Zeitschift* за 14 іюля 1893 г.

Фиг. 142.



Подобная же форма дви-

*) См. *Elect. Zeit.* XI, 81, Febr 17, 1893. *Industries* XIV, 89.

**) *Elect. Zeit.* XI, 81, 178, 283, 285, 411; 1893. *Industries* XIV, 89, 327, 425, 522; 1893.

гателя описана въ маѣ 1891 г. фирмой Геліосъ *). Этотъ двигатель представленъ на фиг. 142.

Теорія однофазныхъ двигателей.

Трудность изученія явленій, происходящихъ въ однофазномъ двигателѣ перемѣннаго тока, зависить оттого, что тутъ, кромѣ того, что роторъ пронизываетъ обыкновенное перемѣнное поле, индуктирующее въ немъ токи съ ихъ противодѣйствующими полями, еще происходитъ вращеніе ротора, вслѣдствіе котораго эти токи и поля будутъ имѣть иную частоту, чѣмъ главный токъ. Всякая теорія, которая будетъ имѣть дѣло со всѣми этими элементами и принимать во вниманіе величину и фазу каждаго, будетъ несомнѣнно заключать въ себѣ формулы со множествомъ буквъ и знаковъ, физическое значеніе которыхъ не всегда будетъ легко понять. Съ другой стороны теорія, въ которой для простоты пренебрегаютъ однимъ или нѣсколькими изъ этихъ обстоятельствъ, будетъ несомнѣнно слишкомъ неполна, чтобы быть удовлетворительной.

Здѣсь мы прежде всего дадимъ легко понимаемую аналитическую теорію, данную Де-Бастомъ **), затѣмъ графическій методъ изученія вопроса, предложенный Феррарисомъ ***) и наконецъ въ третьихъ постараемся дать легко запоминаемую картину того, что въ дѣйствительности происходитъ въ двигателѣ.

Представимъ себѣ прежде всего, что двухфазный двигатель пришелъ въ движеніе и вращается съ постоянной скоростью m оборотовъ въ секунду. Пусть его питаетъ неизмѣняющійся перемѣнный токъ, слѣдующій простому синусоидальному закону, и пусть частота этого тока будетъ n періодовъ въ секунду. Въ этомъ случаѣ плотность потока (**B**), создаваемаго катушками статора, въ каждый моментъ времени будетъ:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \; Sin \; 2\pi nt,$$

гдѣ $\mathbf{B}_0$ есть наибольшая плотность потока, которой онъ только

---

*) D. R. Patent. 70084.

**) *De-Bast* „Bull. de l'Ass. des Ing. Electriciens.“ Aug 1893.

***) *G. Ferraris* „A metod for Treatement of Rotating or Alternating Vectors & C. *The Electrician* XXXIII, 110, 129, 152 и 184.



достигаетъ въ теченіе каждаго періода. Мы будемъ предполагать, что проницаемость μ постоянна. Если площадь, ограничиваемая проводникомъ, охватывающимъ роторъ по діаметру и составляющая уголъ a съ плоскостью нормальной къ направленію поля, созданнаго статоромъ, равна A, то весь магнитный потокъ пронизывающій эту площадь, будетъ:

$$\mathbf{N} = A \; Cos \; a \; \mathbf{B}_0 \; Sin \; 2\pi n t,$$

причемъ предполагается, что плотность потока вездѣ одинакова.

Такъ какъ роторъ вращается со скоростью m оборотовъ въ секунду, то

$$a = 2\pi m t.$$

Электродвижущая сила въ проводникѣ равняется вообще,

$$E = -\frac{d\mathbf{N}}{dt}$$

слѣдовательно въ нашемъ случаѣ

$$E = -A\mathbf{B}_0 (-2\pi m \; Sin 2\pi n t \; Sin 2\pi m t + 2\pi n \; Cos 2\pi m t \; Cos \; 2\pi n t) =$$
$$= -\frac{A\mathbf{B}_0}{2}[2\pi(n+m) Cos 2\pi (n+m) t + 2\pi (n-m) Cos 2\pi (n-m) t].$$

Такимъ образомъ электродвижущая сила есть сумма двухъ простыхъ гармоническихъ электродвижущихъ силъ, частоты которыхъ равняются $(n+m)$ и $(n-m)$.

Если мы обозначимъ сопротивленіе проводника черезъ r и его коэффиціентъ самоиндукціи черезъ L, то кажущіяся сопротивленія, зависящія отъ этихъ двухъ электродвижущихъ силъ, будутъ,

$$I_1 = \sqrt{r^2 + 4\pi^2 (n+m)^2 L^2}$$
$$I_2 = \sqrt{r^2 + 4\pi^2 (n-m)^2 L^2}$$

Мгновенная сила тока въ проводникѣ будетъ:

$$C = -\frac{A\mathbf{B}_0}{2}\left[\frac{2\pi (n+m)}{I_1} \; Cos \left\{ 2\pi (n+m) t - \phi_1 \right\} + \frac{2\pi (n-m)}{I_2} \; Cos \left\{ 2\pi (n-m) t - \phi_2 \right\}\right]$$

Углы отставанія ϕ_1 и ϕ_2 опредѣляются условіями:

$$Cos \; \phi_1 = \frac{r}{I_1}$$
$$Cos \; \phi_2 = \frac{r}{I_2}$$

*

Потенціальная энергія проводника равна:

$$W = -\mathbf{N}C = -CA\mathbf{B}_0 \, Cos\, a \, Sin\, 2\pi\, nt.$$

Слѣдовательно при элементарномъ его перемѣщеніи на уголъ da, работа будетъ, пренебрегая знакомъ:

$$dW = CA\mathbf{B}_0 \, Sin\, 2\pi\, nt \, Sin\, a\, da.$$

Подставляя сюда величину C, полученную выше и величину $2\pi m dt$ вмѣсто da, получимъ:

$$d\,W = \frac{A^2 \mathbf{B}_0^2}{2}\left[\frac{2\pi(n+m)}{I_1}\, Cos\left\{2\pi(n+m)t - \phi_1\right\} + \right.$$

$$\left. + \frac{2\pi(n-m)}{I_2}\, Cos\left\{2\pi(n-m)t - \phi_2\right\}\right] \times 2\pi\, m\, Sin\, 2\pi\, nt\, Sin\, 2\pi\, mt\, dt.$$

Интегрируя это выраженіе въ предѣлахъ $t = 1$ и $t = 0$, мы опредѣлимъ работу, производимую въ секунду, т. е. среднюю мощность одного проводника. Произведя интегрированіе получимъ:

$$P = \frac{2\pi m A^2 \mathbf{B}_0^2}{8}\left[\frac{2\pi(n-m)}{I_2}\, Cos\, \phi_2 - \frac{2\pi(n+m)}{I_1}\, Cos\, \phi_1\right] =$$

$$\frac{2\pi\, mr\, A^2 \mathbf{B}_0^2}{8}\left[\frac{2\pi(n-m)}{I_2^2} - \frac{2\pi(n+m)}{I_1^2}\right].$$

Полная средняя мощность получится, умножая выведенную на число проводниковъ Z. Моментъ же вращенія получится, раздѣляя эту среднюю мощность на число радіановъ въ секунду, т. е. на $2\pi m$. Итакъ

$$\text{Моментъ вращенія} = \frac{ZP}{2\pi m}.$$

Такимъ образомъ, мы окончательно *) получимъ слѣдующую формулу:

$$\text{Моментъ вращенія} = \frac{r Z A^2 \mathbf{B}_0^2 \pi}{4}\left[\frac{n-m}{r^2 + 4\pi^2(n-m)^2 L^2} - \frac{n+m}{r^2 + 4\pi(n+m)^2 L^2}\right]$$

Проф. Феррарисъ **) далъ другой способъ изслѣдованія нашего вопроса, въ которомъ перемѣнное поле разсматривается,

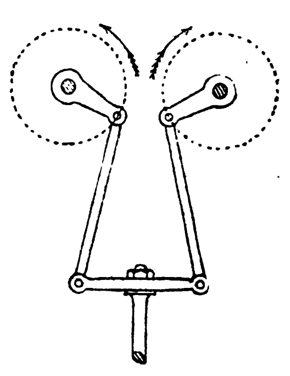
*) Сравнить *Hutin et Leblanc*. Lum. Electr. XI, 418 (1891).

**) Calileo Ferraris „A. Method for the Treatement etc." The Electrician XXXIII, 110, 129, 152, 184; 1894.



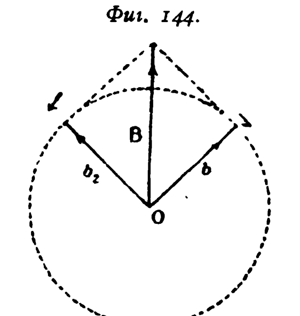
какъ разложенное на два поля, вращающихся въ противоположныя стороны. Существуетъ много механизмовъ, въ которыхъ простое гармоническое прямолинейное движеніе разлагается на два круговыхъ, происходящихъ въ обратныхъ направленіяхъ. На фиг. 143, представленъ одинъ очень извѣстный механизмъ такого рода. Амплитуда разлагаемаго движенія равняется діаметру каждаго кругового. Феррарисъ разсматриваетъ задачу о перемѣнномъ магнитномъ полѣ очень обще, примѣняя къ ней геометрическое понятіе вращающихся векторовъ.

Фиг. 143.



Если посредствомъ вектора b_1 (фиг. 144), равномѣрно вращающагося по направленію часовой стрѣлки вокругъ точки O, мы изобразимъ величину и направленіе одного вращающагося поля и посредствомъ вектера b_2—величину и направленіе другого поля того же напряженія, вращающагося въ обратную сторону, съ тою же частотою n, то легко можемъ видѣть, что получающееся отъ ихъ сложенія поле будетъ направлено всегда по прямой B. Напряженіе же его будетъ мѣняться въ предѣлахъ $+2b$ и $-2b$, слѣдуя синусоидальной зависимости отъ времени, такъ что мы можемъ написать:

Фиг. 144.



$$\mathbf{B} = 2\,b \sin 2\pi n t.$$

Обратно, если мы имѣемъ перемѣнное магнитное поле, измѣняющееся по закону

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \sin 2\pi n t,$$

подобное существующему въ однофазныхъ двигателяхъ, то мы всегда можемъ разложить его на два вращающихся въ противо-

положныхъ направленіяхъ поля той же частоты n и разсматривать въ отдѣльности дѣйствіе каждаго на роторъ.

Если роторъ вращается по направленію часовой стрѣлки съ частотой m, то частота вращающагося въ томъ же направленіи поля по отношенію къ ротору будетъ $n-m$, частота же поля, вращающагося въ обратномъ направленіи, будетъ $n+m$.

Можно считать, что каждое поле создаетъ токи въ роторѣ, и моментъ вращенія, производимый такими токами, проходящими по проводникамъ во вращающемся полѣ, можетъ быть вычисленъ по формулѣ, которую мы употребляли для двигателей съ вращающимся полемъ.

Именно мы уже нашли (стр. 162), что поле, вращающееся относительно ротора со скоростью s, производитъ моментъ вращенія.

$$T = q\,\frac{r\,s}{r^2 + 4\,\pi^2\,L^2\,s^2}.$$

Моментъ вращенія, производимый двумя полями, вращающимися въ обратныя стороны, будетъ:

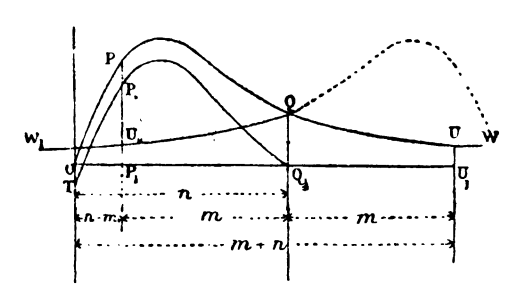
$$\text{Моментъ вращенія} = qr\left[\frac{n-m}{r^2 + 4\pi^2\,L^2\,(n-m)^2} - \frac{n+m}{r^2 + 4\pi L^2\,(n+m)^2}\right]$$

Это тоже выраженіе, что мы получили на стр. 180, гдѣ

$$q = \frac{Z\,A^2\,\mathbf{B}_0^{\,2}\,\pi}{4}.$$

Принимать во вниманіе моментъ вращенія, происходящій

Фиг. 145.



вслѣдствіе того, что токи, производимыя однимъ вращательнымъ полемъ, проходятъ черезъ проводники, находящіеся въ другомъ

полѣ вращающемся въ *противоположномъ* направленіи, не нужно, такъ какъ частота этихъ токовъ разнится на $2m$ отъ частоты противуположнаго поля и слѣдовательно направленіе этого момента быстромѣняется.

Чтобы найти моментъ вращенія, производимый полемъ вращающимся по направленію часовой стрѣлки съ частотою $(n-m)$, начертимъ кривую $OPQW$ (фиг. 145, см. фиг. 135, гдѣ подобная кривая уже есть, только она начерчена въ обратную сторону), изображающую связь между сдвигомъ и моментомъ вращенія, которую даетъ формула:

$$T = q \frac{rs}{r^2 + 4\pi^2 L^2 s^2}.$$

Пусть OQ_1 представитъ скорость вращенія поля съ частотою n. Отложивъ отъ точки Q_1 въ направленіи къ точкѣ O, длину $Q_1P_1 = m$ (скорости вращенія ротора), мы получимъ абсциссу $OP_1 = n-m$ и ордината P_1P, ей соотвѣтствующая, изобразитъ искомый моментъ вращенія.

Чтобы найти моментъ вращенія, производимый полемъ, вращающимся противъ часовой стрѣлки, отложимъ отъ точки Q_1 вправо длину $Q_1U_1 = m$. Тогда $OU_1 = n+m$ и ордината UU_1 изобразитъ моментъ вращенія при сдвигѣ въ $n+m$, Такъ какъ этотъ моментъ направленъ обратно моменту PP_1, мы должны отложить отъ точки P по ординатѣ PP_1 внизъ длину $PP_{11} = UU_1$ и тогда получимъ длину $P_{11}P_1$ изображающую истинный моментъ вращенія ротора.

Для удобства, при выводѣ моментовъ, производимыхъ полемъ вращающимся противъ часовой стрѣлки, мы можемъ начертить кривую QW_1 симметричную съ QW и затѣмъ вычитать соотвѣтствующія ординаты одной кривой изъ ординатъ другой, напр. $U_{11}P_1$ изъ PP_1. Продѣлавъ это для всѣхъ ординатъ между точками O и Q_1, мы получимъ новую кривую $TP_{11}Q_1$, ординаты которой дадутъ дѣйствительныя виличины момента вращенія для разныхъ m.

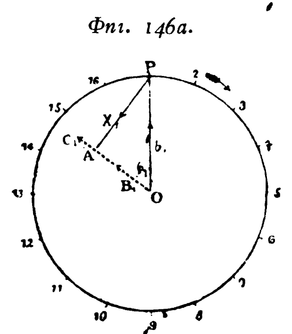
Когда $m=0$, т. е. когда роторъ неподвиженъ, оба противуположныхъ момента уравновѣшиваютъ другъ друга. Когда m увеличивается окончательный моментъ начинаетъ рости, достигаетъ максимума и опять падаетъ до нуля, нѣсколько раньше, чѣмъ

m становится равнымъ *n*. Дальнѣйшее увеличеніе *m* производитъ моментъ обратнаго направленія.

Всѣ эти разсужденія предполагаютъ, что $\mathbf{B}_0$ постоянно, что справедливо только тогда, тогда двигатель питается токомъ постоянной силы. Поэтому полученная нами кривая не можетъ считаться истинной характеристикой однофазнаго двигателя, питаемаго токомъ постояннаго напряженія. Она тѣмъ не менѣе очень полезна, такъ какъ даетъ общую идею о дѣйствіи двигателя. При увеличеніи нагрузки двигателя, его скорость нѣсколько уменьшается, черезъ статоръ начинаетъ проходить болѣе сильный токъ и поле, имъ создаваемое, соотвѣтственно усиливается, такъ что величина, обозначенная черезъ *q*, не будетъ постоянной, но увеличивается съ увеличеніемъ нагрузки. Несмотря однако на свои недостатки, изложенная здѣсь теорія ясно показываетъ, какъ перемѣнный потокъ можетъ произвести вращеніе.

Чтобы составить себѣ представленіе о томъ, что дѣлается въ роторѣ, примѣнимъ для нахожденія направленія результирующаго поля и тока въ случаѣ двухъ вращающихся въ противуположныхъ направленіяхъ векторовъ, построеніе, указанное на фиг. 132. Пусть на чертежѣ 146*a* прямая OP своей длиной и направленіемъ изображаетъ величину и направленіе одного изъ двухъ вращающихся магнитныхъ полей (b_1 на фиг. 144), создающихъ вмѣстѣ перемѣнное поле $\mathbf{B}_0 \sin 2\pi n t$. Положимъ, далѣе, что роторъ вращается по направленію часовой стрѣлки, дѣлая *m* оборотовъ въ секунду, и что прямая OP вращается въ томъ же направленіи съ нѣсколько большею скоростью, дѣлая *n* оборотовъ въ въ секунду. Такъ какъ OP будетъ пересѣкать проводники ротора со скоростью $(n-m)$ оборотовъ въ секунду, то въ этихъ проводникахъ появятся токи, сила которая будетъ мѣняться въ различныхъ точкахъ окружности ротора почти по закону синусовъ. Эти токи, наибольшую силу которыхъ мы обозначимъ черезъ C_1 произведутъ поперечное поле, направленное подъ пря-

Фиг. 146*a*.



мымъ угломъ къ ихъ собственному направленію. Наибольшее напряженіе этого поля обозначимъ черезъ X_1. Послѣднее поле вмѣстѣ съ полемъ, создаваемымъ статоромъ, даетъ результирующее поле, и мы можемъ найти направленія всѣхъ трехъ, полей проведя прямую OA, составляющуя уголъ φ_1 (извѣстный, какъ мы увидимъ дальше) съ прямой OP и опуская на нее изъ точки P перпендикуляръ PA. Тогда OA изобразитъ по величинѣ и направленію результирующее поле B_1, PA — поперечное поле X_1. Уголъ φ_1 извѣстенъ, такъ какъ извѣстно отношеніе напряженія поперечнаго поля къ напряженію результирующаго. Дѣйствительно это отношеніе извѣстно, когда извѣстны скорость $n - m$, сопротивленіе R и магнитное сопротивленіе путей. Разъ извѣстно это отношеніе извѣстенъ, и $tang\,\varphi_1$ (см. стр. 155). Напримѣръ, если поперечный потокъ равенъ $k\,C_1$, то, такъ какъ

$$C_1 = \frac{B_1\, 2\pi\,(n - m)}{R},$$

искомая величина

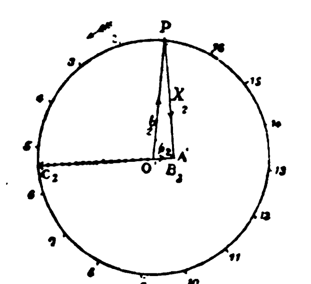
$$tang\,\varphi_1 = \frac{2\pi\,(n - m)\,k}{R}$$

Уголъ φ_1 при полной нагрузкѣ долженъ быть немногимъ больше 45°. Мы можемъ сдѣлать тоже построеніе (фиг. 146*b*) для другого магнитнаго поля изобразивъ прямой OP_1 его величину и направленіе (b_2 на фиг. 144). Въ этотъ разъ

$$tang\,\varphi_2 = \frac{2\pi\,(n + m)\,k}{R}$$

почти въ 40 разъ больше $tang\,\varphi_1$, такъ какъ m отличается отъ n всего на 5% приблизительно.

Фиг. 146b.



Поэтому уголъ φ_2 очень близокъ къ 90° и величина B_2 почти въ 20 разъ меньше B_1. Можно видѣть, что площадь треугольника POA, гораздо больше площади $P'O'A'$, что согласно изложенному на стр. 155, значитъ, что моментъ, направленный по часовой стрѣлкѣ гораздо больше момента, направленнаго противъ стрѣлки.

Чтобы указать направленіе токовъ C_1 и C_2 нужно принять слѣдую-

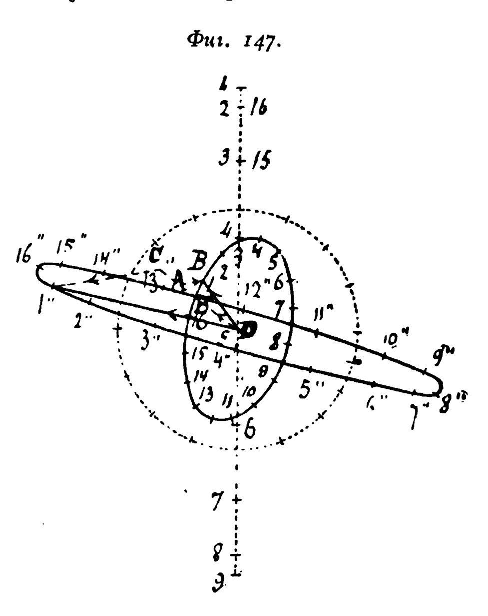
щій условный способъ изабраженія. Предположимъ, что стержни составляющіе обмотку ротора, всѣ замкнуты на себя съ каждой стороны ротора посредствомъ мѣднаго диска, занимающаго всю конечную поверхность ротора. Равномѣрно распредѣленный въ дискѣ токъ, параллельный каждому діаметру, произведетъ синусоидальное распредѣленіе токовъ въ стержняхъ ротора, по которымъ съ одной стороны токъ будетъ приходить, а съ другой стороны уходить. Наибольшей силы токъ будетъ въ тѣхъ двухъ проводникахъ, которые соединены діаметромъ, параллельнымъ направленію тока. Поэтому мы можемъ въ часовой діаграммѣ изобразить силу и направленіе такого тока въ конечной части ротора посредствомъ прямой, проведенной изъ центра, длина которой пропорціональна наибольшей силѣ тока въ стержнѣ ротора. Этотъ способъ изображенія годится и для тѣхъ двигателей, въ которыхъ нѣтъ конечныхъ мѣдныхъ дисковъ, если только распредѣленіе токовъ то же, что и при нихъ. На фиг. 146*a* и 146*b* пунктирныя линіи C_1 и C_2 показываютъ направленіе токовъ въ разсматриваемый моментъ. Они направлены по линіямъ B_1 и B_2, такъ какъ токъ всегда въ одной фазѣ съ результирующимъ магнетизмомъ, и по длинѣ равны X_1 и X_2, такъ какъ эти длины пропорціональны силамъ токовъ. Стрѣлки показываютъ направленія, которыя можно опредѣлить, пользуясь правиломъ Флеминга, замѣтивъ, что головки стрѣлокъ на линіяхъ, изображающихъ магнитные потоки, указываютъ направленія, въ которыхъ двигался бы сѣверный полюсъ.

Опредѣливъ направленіе и напряженіе результирующаго поля, а также направленія и силы токовъ, производимыхъ двумя вращающимися въ противуположныя стороны векторами OP и OP' на фиг. 146*a* и 146*b*, наложимъ одну изъ этихъ фигуръ на другую и произведемъ сложеніе, такъ, чтобы получить одно поле и одинъ токъ. Для этой цѣли окружность надо раздѣлить на нѣкоторое число равныхъ частей напримѣръ на 16, которыя будутъ изображать части періода одного цикла. Въ положеніи № 1 OP совпадаетъ съ OP' и сумма ихъ будетъ векторомъ длины равной двойной длинѣ O 1 (фиг. 147), изображающей наибольшую величину сообщеннаго поля.

Если мы теперь сложимъ векторы B_1 и B_2, принявъ во вни-

маніе ихъ направленія, мы получимъ векторъ $O\,1'$, показанный на фиг. 147. Складывая C_1 и C_2, получимъ вакторъ $O\,1''$. Затѣмъ (возвращаясь къ фиг. 146*a* и 146*b*), передвинемъ точки P и P' въ положеніе 2, при чемъ треугольники POA и $P'O'A'$ соотвѣтственно перемѣстятся. Сложеніе OP и OP_1; B_1 и B_2; C_1 и C_2 дастъ намъ векторы $O\,2$, $O\,2'$ и $O\,2''$. Когда мы произведемъ то же самое для всей окружности круговъ фиг. 146*a* и 146*b*, мы получимъ точки 1, 2, 3...; 1′, 2′, 3′...; и 1″, 2″, 3″... фиг. 147, соединивъ которыя соотвѣтственно между собою, получимъ указанные на чертежѣ прямую и эллипсы.

Фиг. 147.



Полученные два эллипса ясно показываютъ, что происходитъ въ двигателѣ въ теченіе каждой альтернаціи. Эллипсъ съ цифрами 1′2′3′..., отличающійся въ дѣйствительности весьма мало отъ круга (его эксцентриситетъ на рисункѣ увеличенъ съ цѣлью показать, какъ онъ строится), показываетъ, что существуетъ вращающееся магнитное поле, напряженіе котораго немного мѣняется, имѣющее ту же частоту n, что и поле, производимое питающимъ токомъ (изображенное прямой 1, 2, 3...). Послѣднее въ свою очередь уничтожается или, вѣрнѣе, преобразуется во вращающемся поле токами, циркулирующими въ роторѣ. Направленіе вращенія этого поля тоже, что и направленіе вращенія ротора. Второй эллипсъ, съ цифрами 1″2″3″..., показываетъ, что существуетъ вращающійся токъ, сила котораго измѣняется въ очень большихъ предѣлахъ. Въ моментъ 1″ она какъ разъ достигаетъ максимума и токъ идетъ справа налѣво по оконечности ротора, на которую мы смотримъ. Въ моментъ 4″ сила тока почти-что наименьшая и токъ идетъ внизъ. Въ моментъ 8″ токъ опять становится очень сильнымъ и

идетъ слѣва направо. Вращается онъ, какъ видно, по направленію обратному направленію вращенія ротора и поля.

Чтобы понять, какъ подобное поле и токъ могутъ произвести моментъ вращенія мы должны прежде всего посмотрѣть, въ какомъ отношеніи будутъ ихъ фазы. Когда токъ имѣетъ наибольшую силу, около точки 16'', поле совпадаетъ съ ними по фазѣ, т. е. оба они изображаются прямыми, имѣющими одно и то же направленіе, показываемое стрѣлками. При этомъ образуется большой моментъ вращенія направленный въ ту же сторону, что и вращеніе ротора. Въ моменты 1'' и 2'' сила тока уменьшается и согласіе его фазъ съ фазами поля нарушается, однако моментъ вращенія остается положительнымъ. Но, какъ только разность фазъ становится большей прямого угла, моментъ вращенія становится отрицательнымъ. Въ этотъ моментъ токъ будетъ очень слабъ и величина угла мѣняется очень быстро, такъ что только въ моменты 3'', 4'' и 5'' существуетъ слабый отрицательный моментъ вращенія, въ моменты 6'', 7'', 8'', 9'' и 10'' онъ опять уже положителенъ и притомъ въ моментъ 8'' очень великъ. Въ теченіе одной альтернаціи моментъ вращенія дважды будетъ отрицательнымъ и дважды положительнымъ, но положительный моментъ значительно превосходитъ отрицательный по величинѣ и кромѣ того онъ существуетъ гораздо большее время.

Съ перваго взгляда не ясно, почему вращающееся поле, столь мало мѣняющееся по напряженію, производитъ въ роторѣ токъ такого большого эксцентриситета, какой указываетъ эллипсъ. Однако надо вспомнить, что скорость тока относительно проводниковъ равна всего $(n - m)$, тогда какъ небольшія измѣненія въ напряженіи вращающагося поля имѣютъ частоту n періодовъ въ секунду.

Наклонъ большой оси эллипса 1', 2', 3' . . . къ направленію перемѣннаго поля увеличивается, при увеличеніи скорости двигателя. Этотъ уголъ равенъ $\frac{1}{2}(\varphi_2 - \varphi_1)$.

Обратная электродвижущая сила въ проводникахъ статора производится вращеніемъ результирующаго поля, которое мы разсматривали. Фазы ея поэтому указываются положеніемъ векторовъ 01'02'03'.. и т. д., которые практически, какъ мы видѣли суть радіусы круга. Обратная электродвижущая сила достигаетъ наибольшей мгно-

венной величины, когда векторъ находится подъ прямымъ угломъ къ центральной прямой, изображающей направленіе перемѣннаго поля. Токъ въ обмоткахъ статора будетъ наиболѣе сильнымъ въ моментъ 1, т. к. при этомъ сообщенное поле имѣетъ наибольшее напряженіе. Мы видимъ отсюда, что наклонъ вектора 01′ въ этотъ моментъ, или, другими словами, уголъ, на который онъ перемѣстился отъ положенія перпендикулярнаго къ центральной линіи, даетъ уголъ отставанія тока въ обмоткахъ статора, относительно обратной электродвижущей силы. Предположимъ напримѣръ, что двигатель вращается почти синхронично. Уголъ φ_1 будетъ при этомъ почти равенъ нулю, такъ что B_1 будетъ равенъ b_1 и будетъ совпадать съ нимъ по фазѣ. Съ другой стороны B_2 будетъ такъ мало, что практически имъ можно пренебречь. Въ моментъ 1, когда сила тока наибольшая, уголъ, на который перемѣстилась линія B_1 отъ положенія перпендикулярнаго къ центральной линіи, равняется приблизительно 90°. Это есть уголъ отставанія тока отъ электродвижущей силы. При нагрузкѣ двигателя уголъ φ_1 увеличивается а уголъ отставанія уменьшается. Однако не нужно предполагать, что B_1 уменьшается, какъ это кажется на нашемъ чертежѣ. Мы должны увеличить размѣръ чертежа такъ, чтобы векторъ, изображающій результирующій магнитизмъ, былъ почти постояненъ [1]). Тогда было бы возможно для каждаго даннаго двигателя сдѣлать то же построеніе для различныхъ величинъ сдвига, и на основаніи разностей въ площадяхъ треугольниковъ $A' \; O' \; P'$ и $A \; O \; P$ построить его характеристику.

[1]) Результирующій магнитизмъ пропорціоналенъ обратной электродвижущей силѣ, которая на практикѣ при работѣ мѣняется не болѣе, какъ на 2%. О точномъ соотношеніи между обратной электродвижущей силой и сообщаемой электродвижущей силой см. *Steinmetz, Amer. Inst. Electr. Engineers*. Dec. 1894, p. 803.



ГЛАВА IX.

Различные двигатели перемѣнаго тока.

Всѣ двигатели перемѣннаго тока могутъ быть раздѣлены на слѣдующіе пять классовъ:

А. Однофазные синхронные двигатели. Это на самомъ дѣлѣ обыкновенныя динамомашины перемѣннаго тока, примѣняемыя какъ двигатели. Сами они въ движеніе не приходятъ.

В. Многофазные синхронные двигатели. О нихъ будетъ сказано ниже.

С. Многофазные асинхронные двигатели. Они составляютъ главный предметъ настоящей книги.

D. Однофазные асинхронные двигатели. Однофазные двигатели, о которыхъ говорилось въ предыдущей главѣ. Требуютъ для пусканія въ ходъ приспособленія, сдвигающаго фазы.

E. Двигатели съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ и пластинчатыми сердечниками. При небольшихъ размѣрахъ годится всякій обыкновенный двигатель постояннаго тока съ коллекторомъ и щетками, если только сердечники его индуктора пластинчатые. Эти двигатели не особенно хороши, такъ какъ ихъ самоиндукція обыкновенно велика.

Многофазные синхронные двигатели. Многофазная система распредѣленія, весьма удобная въ томъ отношеніи, что позволяетъ

легко имѣть двигатели, приходящіе самостоятельно во вращеніе, не исключаетъ возможности ставить и синхронные двигатели въ случаяхъ, когда требуется абсолютное постоянство скорости вращенія. Синхроннымъ двигателемъ при многофазной системѣ распредѣленія можетъ служить всякій альтернаторъ, включенный между двумя изъ проводниковъ. Однако лучше, если онъ устроенъ какъ многофазный генераторъ (см. главу I) и соединенъ со всѣми проводами линіи. Отъ асинхроннаго двигателя онъ отличается главнымъ образомъ тѣмъ, что роторомъ у него служитъ электромагнитъ (индукторъ), возбуждаемый особымъ постояннымъ токомъ. Такъ какъ полюсы сохраняютъ постоянно одно и то же положеніе относительно желѣза магнита, разъ только они приведены въ вращеніе со скоростью вращенія полюсовъ арматуры, то вслѣдствіе того, что сѣверный и южный полюсы притягиваютъ другъ друга, магнитъ продолжаетъ вращаться совершенно синхронично.

Для ознакомленія съ принципами, управляющими синхроничными движеніями, слѣдуетъ обратиться къ другому труду автора этой книги «*Dynamo-Electric Machinery*» и къ другимъ трудамъ, касающимся того же вопроса [1]).

Обыкновенный однофазный синхронный двигатель долженъ приводится въ вращеніе до требуемой скорости при помощи какого-нибудь посторонняго источника энергіи; въ многофазныхъ же системахъ дѣйствіе вращающагося поля на паразитные токи въ широкихъ, не пластинчатыхъ, полюсныхъ наконечникахъ индуктора,

---

[1]) *Dr. J. Hopkinson.* „On the Theory of Alternating currents, particulary in. reference to Two Alternate-Current Machines connected to the same Circuit". *Journ. Soc. Tel. Eng.* Vol XIII, p. 496, (1884).

W. M. Mordey. „On Parallel Working with Special Reference to Long Lines". *Inst. of Electr Engin.* XXIII, 260 (1894).

Blondel. „Couplage et Synchronisation des Alternateurs". *Lum. Elect.* XIV 351 (1892).

Steinmetz. „Theory of a Synchronous Motor" Amer. Inst. Electr. Eng. Oct. 17 (1894).

Picou. „Transmission de Force par moteurs Alternatifs Synchrones" *Soc. Intern. des Electr.* Feb. (1895).

Bedell and Ryan. „Action of Single-Phase Synchronous Motor". *Journ. Frank Inst.* March. (1895),

Rhodes. „Theory of the Synchronous Motor" Proc. Phys. Soc. (1895).

достаточно для приведенія двигателя въ вращеніе. Такимъ образомъ существуетъ возможность такъ скомбинировать принципъ устройства многофазнаго асинхроннаго двигателя съ принципомъ устройства настоящаго синхроннаго двигателя, что получится двигатель, могущій самостоятельно приходить въ движеніе и затѣмъ, достигнувъ нормальной скорости, сохранять эту скорость при всякихъ нагрузкахъ, если только не будетъ мѣняться періодичность питающаго тока. Надо однако замѣтить, что, хотя всякій многофазный генераторъ будетъ работать какъ синхронный двигатель, но не всякій будетъ приходить самостоятельно во вращеніе.

Если нужно, чтобы онъ могъ самостоятельно приходить въ движеніе, то слѣдуетъ его устраивать такъ, чтобы легче могли образоваться паразитые токи въ его полюсныхъ наконечникахъ. Отличнымъ примѣромъ установки, въ которой примѣняются синхронные двигатели этого рода, можетъ служить установка въ Ponemah Cotton Mills, Taftville, Conn. U. S. A. [1]).

Шестьсотъ лошадиныхъ силъ передаются на разстояніе 3 миль отъ гидравлической установки въ видѣ тока въ 2.500 вольтъ. Система трехфазная. Двигатели по устройству своему совершено подобны генераторамъ и, обладая способностью приходить самостоятельно въ движеніе, вращаются при различныхъ нагрузкахъ совершенно синхронично. Отдача всей передачи, т. е. отношеніе количества энергіи, получаемой на шкивахъ двигателей къ количеству энергіи, затрачиваемому на шкивахъ генераторовъ, равняется 80%.

Существуетъ нѣсколько двигателей перемѣннаго тока, которые не подходятъ ни къ одному изъ вышеперечисленныхъ классовъ и едва ли могутъ быть какъ нибудь классифицированы.

Двигатель Э. Томсона. Во время своихъ изслѣдованій надъ дѣйствіями перемѣнныхъ токовъ [2]) (1886—1887 г.)., Э. Томсонъ замѣтилъ, что мѣдное кольцо, помѣщенное въ перемѣнное магнитное поле, стремится или выйти изъ поля или повернуть-

---

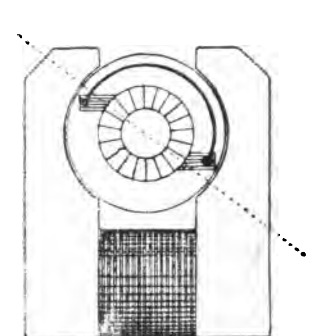
[1]) Electr. Rev. (N. I.) XXIV, p, 210. May 2, (1894).

[2]) *Elihu Thomson.* „Novel Phenomena of Alternating Currents“. *Electr. World.* (N. J.) IX, May 28 (1887) p, 258, XIV, Oct. 5. (1889) p. 231.



ся такъ, чтобы стать вдоль магнитныхъ линій. Изъ этого слѣдуетъ, что если обыкновенную арматуру (напримѣръ барабанную) помѣстить въ перемѣнное поле, перемѣстить щетки въ какую нибудь сторону отъ нейтральной линіи (фиг. 148) и соединить ихъ между собою, то арматура начнетъ вращаться и можетъ доставить значительное количество энергіи. Разъ арматура пришла во вращеніе, она будетъ продолжать вращаться даже, если щетки разъединить или совсѣмъ отнять. Основываясь на этомъ, Э. Томсонъ устроилъ двигатели, въ которыхъ коллекторомъ и щетками пользуются только для пусканія въ ходъ. Затѣмъ, когда арматура начнетъ вращаться, ее замыкаютъ на себя, совершенно уединяя отъ остальныхъ цѣпей. Двигатель послѣ этого работаетъ совершенно какъ однофазный индукціонный двигатель. Двигатель этого рода имѣлся на Парижской выставкѣ 1889 г. Въ 1892 г. Э. Томсонъ взялъ патентъ на двигатель перемѣннаго тока, предназначенный для работы въ однофазныхъ цѣпяхъ, въ которомъ вращающее усиліе производится при помощи вспомогательныхъ конденсаторовъ, шунтирующихъ катушки, помѣщенныя на перемѣнныхъ полюсахъ.

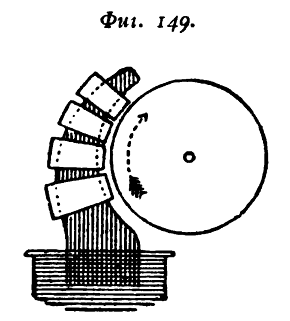
Фиг. 148.



Двигатель Ферранти-Райта. Если конецъ желѣзной пластинчатой полосы помѣстить въ намагничивающую катушку, по которой проходитъ перемѣнный токъ, то онъ будетъ испытывать перемѣнное намагниченіе. Если, далѣе, гдѣ нибудь на продолженіи полосы помѣстить массивное мѣдное кольцо, то паразитные токи, образующіеся въ немъ, не совпадая по фазѣ съ первичнымъ токомъ, будутъ дѣйствовать на перемѣнное намагниченіе и задерживать фазу магнитной полярности во всѣхъ точкахъ впереди. Изъ этого слѣдуетъ, что если два или три такихъ кольца, или нѣсколько замкнутыхъ на себя полосъ мѣди, помѣщены въ разныя мѣста желѣзнаго сердечника, то они вызовутъ какъ бы перемѣщеніе полюсовъ вдоль по сердечнику совершаю-

щееся съ опредѣленною скоростью. За сѣвернымъ полюсомъ послѣдуетъ южный, затѣмъ опять сѣверный и т. д., причемъ всѣ полюсы будутъ направляться къ вершинѣ и тамъ сходить съ сердечника. На этомъ принципѣ устроенъ двигатель Ферранти-Райта Онъ употребляется въ электрическихъ счетчикахъ Ферранти предназначенныхъ для перемѣнныхъ токовъ. Вращающійся дискъ помѣщается между двумя изогнутыми полюсными наконечниками изъ пластинчатаго желѣза. На каждомъ изъ этихъ наконечниковъ и помѣщены (фиг. 149) задерживающія мѣдныя кольца.

Фиг. 149.



Двигатель Шалленбергера. Въ этомъ двигателѣ, который тоже употребляется въ электрическомъ счетчикѣ перемѣннаго тока, вращеніе желѣзнаго диска достигается весьма простымъ способомъ сдвиженія фазъ. Дискъ помѣщается между двумя прямоугольными катушками, внутри которыхъ, проходя подъ дискомъ и надъ дискомъ, помѣщена подъ угломъ въ 45° къ главной катушкѣ, индуктирующей въ ней токъ, еще одна замкнутая на себя катушка, или, вѣрнѣе, мѣдная штампованная пластина. Если бы эта послѣдняя лежала параллельно главной катушкѣ, то въ ней индуктировались бы болѣе сильные токи, но они бы не производили вращательнаго дѣйствія. Если бы она лежала подъ прямымъ угломъ къ главной катушкѣ, въ ней бы вовсе не индуктировался бы токъ и слѣдовательно опять не было бы вращательнаго дѣйствія. Такъ какъ токи въ ней отличаются по фазѣ отъ главныхъ немного болѣе, чѣмъ на четверть періода, то ея наклонное положеніе даетъ составляющую для результирующаго поля, производящаго вращеніе. Это результирующее вращающееся поле въ дѣйствительности эллиптическое (см. стр. 72).

Двигатель Аткинсона. Въ 1888 году [1]), Ллевеллинъ Аткинсонъ (инженеръ фирмы Гульденъ и К°) спроектировалъ нѣсколько двигателей перемѣннаго тока, отличающихся тѣмъ, что

[1]) Spec. of Patent. 16.852 (1888) и 7895 (1889).

у нихъ имѣется по два ротора (или по двѣ арматуры), помѣщенныхъ рядомъ, замкнутыя обмотки которыхъ соединены между собою, и по двѣ отдѣльныхъ неподвижныхъ части съ обмотками, по которымъ пропускается перемѣнный токъ. Каждый роторъ служитъ по очереди трансформаторомъ, посылающимъ токъ въ сосѣднюю обмотку, производя такимъ образомъ вращающее усилія, хотя тутъ и не образуется вращающееся поле.

Двигатели Стэнли-Келли. Вильямъ Стэнли (*Pittsfield, Massachusetts*), компаньонъ съ 1886 г. Вестингауза въ дѣлѣ усовершенствованія машинъ перемѣннаго тока, придумалъ двухфазную систему [2]), въ которой генераторъ принадлежитъ къ типу «индукторныхъ», т. е. къ типу, въ которомъ вращающаяся часть состоитъ только изъ стального колеса съ полюсными наконечниками изъ пластинчатаго желѣза. Двигатель Стэнли-Келли-Чесней, употребляемый въ этой системѣ, значительно отличается отъ большинства двигателей, описанныхъ въ этой книгѣ, такъ какъ въ немъ вовсе нѣтъ вращающагося поля. Статоръ, черезъ который пропускаются двухфазные токи, состоитъ изъ двухъ совершенно отдѣльныхъ частей, черезъ каждую изъ которыхъ пропускается одинъ изъ двухъ токовъ. Такимъ образомъ статоръ производитъ два независимыхъ перемѣнныхъ магнитныхъ поля съ разностью фазъ въ 90°.

Между этими частями статора, помѣщенными рядомъ, вращаются два ротора тоже укрѣпленныхъ рядомъ на общемъ валу. Обмотки этихъ роторовъ соединены между собою такъ, что проволока, помѣщающаяся непосредственно подъ полюсомъ одной арматуры, соединена послѣдовательно съ проволокой, помѣщающейся между полюсами въ дргуой. При такомъ соединеніи, каждый роторъ дѣйствуетъ—то какъ двигатель, получающій токъ и приводимый этимъ токомъ въ движеніе, то какъ трансформаторъ, посылающій токъ въ другой роторъ. Обмотки обоихъ роторовъ замкнуты на себя и не имѣютъ никакихъ внѣшнихъ соединеній, контактныхъ колецъ или коллекторовъ. Изобрѣтатели утверждаютъ, что такіе двигатели при началѣ движенія даютъ моментъ вращенія въ $1^1/_2$—2 раза большій, чѣмъ работая при пол-

[2]) Electr. World p. 325, (1893).



ной нагрузкѣ. Параллельно съ цѣпями статора включаются конденсаторы, доставляющіе при пусканіи въ ходъ дополнительный токъ и предупреждающіе паденіе напряженія, вызываемое индукціей. При пусканіи въ ходъ въ цѣпь статора включается дополнительное сопротивленіе.

Двигатель Дункана. Этотъ двигатель представляетъ изъ себя нѣчто среднее между двигателями Шалленбергера и Ферранти, причемъ наклонная катушка перваго замѣнена наклоннымъ желѣзнымъ сердечникомъ, снабженнымъ около концовъ задерживательными мѣдными цѣпями. Такіе двигатели примѣнимы для трехфазныхъ системъ и предназначаются для счетчиковъ.

Двигатели Морди. Морди придумалъ нѣсколько типовъ двигателей перемѣннаго тока. Въ одномъ изъ нихъ — двигателѣ съ пластинчатымъ желѣзомъ—Морди предлагаетъ пропускать часть перемѣннаго тока черезъ коммутаторъ, помѣщенный на валу, съ цѣлью получить токъ для возбужденія индукторовъ. При этомъ, по мѣрѣ увеличенія скорости двигателя частота тока въ немъ будетъ уменьшаться, пока не будетъ достигнутъ синхронизмъ. Послѣ этого токъ въ индукторѣ будетъ уже всегда сохранять одно направленіе.

Двигатель Ганца. Подобнаго же рода устройство предложено формой Ганца и К⁰ въ Буда-Пештѣ.

Двигатель Лангдонъ-Дэвиса. Это двигатель съ сдвинутыми фазами, имѣющій двѣ или болѣе серіи катушекъ, помѣщенныхъ подъ различными углами. Обмотки разсчитаны такъ, чтобы, имѣя одинаковое число амперъ-витковъ, они разнились по фазѣ токовъ на углы, служащіе дополнительными для угловъ положенія соотвѣтственныхъ катушекъ.

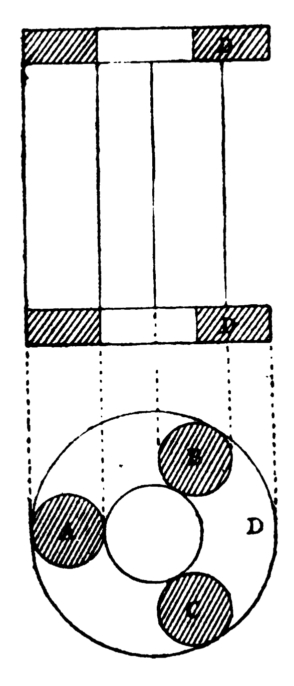
ГЛАВА X.

Многофазные трансформаторы.

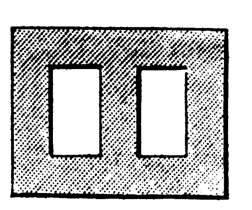
Принципъ, на которомъ основана трансформація многофазныхъ токовъ въ токи болѣе или менѣе высокаго напряженія, почти не отличается отъ принципа трансформаторовъ однофазныхъ токовъ. Законъ, гласящій, что отношеніе $\frac{E_1}{E_2}$ электродвижущихъ силъ въ первичной и вторичной обмоткахъ равняется отношенію чиселъ витковъ $\frac{S_1}{S}$ въ этихъ обмоткахъ, конечно, примѣнимъ ко всякимъ обмоткамъ одной и той же магнитной цѣпи. Точно такъ же примѣнимы одинаково къ многофазнымъ и однофазнымъ токамъ и законы, касающіеся потерь въ желѣзѣ и въ мѣди. Поэтому трансформація многофазныхъ токовъ можетъ быть произведена при помощи обыкновенныхъ однофазныхъ трансформаторовъ, помѣщая въ каждую цѣпь отдѣльный приборъ, повышающій или понижающій напряженіе въ желаемой степени. Однако удобнѣе имѣть для этой цѣли одинъ трансформаторъ, тѣмъ болѣе, что, поступая такимъ образомъ, мы получаемъ еще экономію въ матеріалахъ. Напримѣръ, въ случаѣ трехфазныхъ токовъ, совершенно такъ же, какъ вмѣсто шести проволокъ, употреблявшихся прежде, можно употребить всего три, соединивъ въ одной точкѣ всѣ три цѣпи, и тѣмъ сдѣлать экономію въ мѣди, въ трансформаторѣ можно сдѣлать экономію въ желѣзѣ, соединивъ между собою на обоихъ концахъ сердеч-

ники, на которыхъ сдѣланы обмотки трансформатора. На фиг. 150 схематически изображенъ такой трансформаторъ, въ которомъ сердечники *A*, *B* и *C* соединены между собою на концахъ. Такъ какъ эти сердечники должны быть пластинчатые, то весь остовъ трансформатора удобнѣе строить изъ частей штампованныхъ изъ листоваго желѣза, подобнымъ изображеннымъ на фиг. 151 и 152. Если обмотки сдѣланы вокругъ частей *A*, *B* и *C*, то потокъ въ нихъ будетъ слѣдовать закону, подобному закону, управляющему измѣненіями циркулирующихъ въ обмоткахъ токовъ, т. е. это будетъ трехфазный потокъ съ разностью въ 120° между фазами въ каждомъ сердечникѣ. Замѣтимъ, что части D′ D″ D‴ (фиг. 152) образуютъ соединеніе треугольникомъ между частями *A*, *B* и *C*, слѣдовательно между фазами потока въ нихъ тоже будетъ разность въ 120°. Вообще можно сказать, что чертежъ 55 (стр. 51) показывающій связь между силами токовъ и фазами въ цѣпи, соединенной треугольникомъ, примѣнимъ также и къ потоку въ различныхъ частяхъ сердечника, изображеннаго на фиг. 152

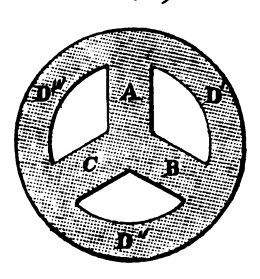
Фиг. 150.



Фиг. 151.



Фиг. 152.

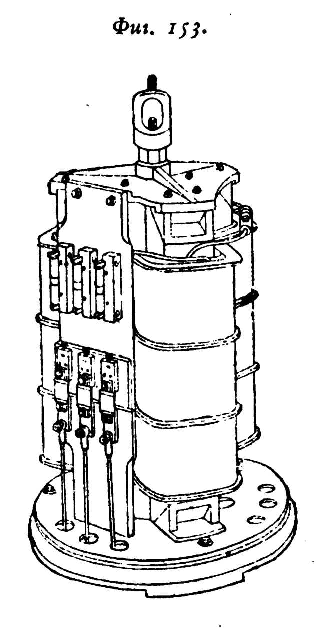


если черезъ *A*, *B* и *C* замѣнить линейные провода, а черезъ

D′ D″ и D‴—стороны трехугольника. Мы можемъ взять въ качествѣ сердечниковъ трансформатора вмѣсто *A*, *B* и *C* части D′ D″ и D‴, можемъ сдѣлать на нихъ или одну изъ обмотокъ, или обѣ, можемъ, наконецъ, соединить эти обмотки между собою звѣздой или трехугольникомъ, и слѣдовательно можемъ получить очень большое число комбинацій.

Употребляемые въ настоящее время въ трехфазныхъ системахъ трансформаторы состоятъ изъ трехъ вертикальныхъ колоннъ изъ пластинчатаго желѣза, снабженныхъ на концахъ общими соединительными частями. Какъ первичная, такъ и вторичная обмотка, дѣлаются обыкновеннымъ способомъ на вертикальныхъ частяхъ прибора. На фиг. 153 изображенъ трехфазный трансформаторъ Берлинской фирмы Сименсъ и Гальске. Трансформаторы, примѣнявшіеся на знаменитой передачѣ Лауффенъ-Франкфуртъ въ 1891 г. и до сихъ поръ примѣняемые при доставленіи трехфазныхъ токовъ городу Гейлбронъ, изображены на стр. 386 оффиціальнаго Отчета о Франкфуртской Выставкѣ. Они были спроэктированы для пониженія напряженія съ 15.000 вольтъ до 100 вольтъ и для обратнаго повышенія и допускали различныя группировки. Соединеніе цѣпей трансформаторовъ показано на фиг. 103 (стр. 118). Общія точки обѣихъ цѣпей, какъ высокаго, такъ и низкаго напряженія, всегда соединялись съ землей.

Фиг. 153.

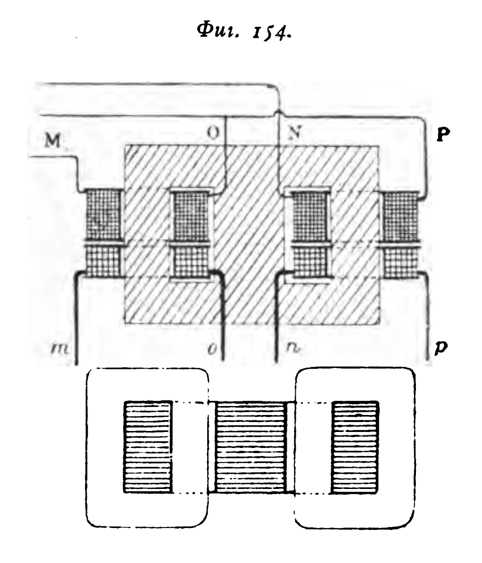


Трехфазный трансформаторъ Сименсъ и Гальске.

Для трансформаціи двухфазныхъ токовъ, можно примѣнять два отдѣльныхъ трансформатора, по одному въ каждой цѣпи. Но опять таки совершенно такъ же, какъ можно получить экономію въ мѣди, комбинируя цѣпи такъ, чтобы обойтись тремя

проводниками вмѣсто четырехъ (одинъ изъ проводниковъ служащій общимъ возвратомъ долженъ быть немного большаго сѣченія), можно сдѣлать экономію въ желѣзѣ, соединяя двѣ изъ магнитныхъ цѣпей въ одну и дѣлая одинъ общій сердечникъ. На фиг. 154 представлены соединенія, которыя при этомъ устраиваются.

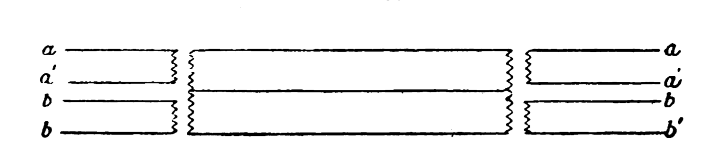
Фиг. 154.



Поперечное сѣченіе общаго сердечника должно быть $\sqrt{2}$ разъ больше, чѣмъ сѣченія отдѣльныхъ сердечниковъ, если только желаютъ имѣть всюду въ желѣзѣ одну и ту же плотность потока.

Въ случаѣ, когда въ двухфазномъ генераторѣ принятъ способъ соединенія многоугольникомъ примѣнить общій возвратъ нельзя. Тогда нужно имѣть для каждой линіи два отдѣльныхъ провода. Однако, если на обоихъ концахъ линіи установлены трансформаторы, то можно обойтись тремя проводами. Подобнаго рода устройство, схематически изображенное на фиг. 155, было примѣнено фирмой Шуккерта на одной изъ своихъ

Фиг. 155.



установокъ для передачи энергіи на Франкфуртской Выставкѣ въ 1891 г.

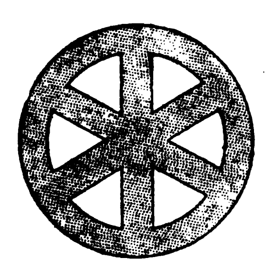
Трансформація фазъ. До сихъ поръ мы говорили все о трансформаціи напряженія въ данной системѣ токовъ. Но есть еще одна задача, которая тоже требуетъ рѣшенія. Именно задача

о преобразованіи двухфазныхъ токовъ въ трехфазные и наоборотъ.

Простота, съ которой эта задача можетъ быть рѣшена, будетъ понята сейчасъ же, если еще немного развить тѣ идеи, съ которыми мы только что имѣли дѣло.

Когда работаетъ трансформаторъ подобный изображенному на фиг. 152, въ немъ образуется магнитное поле, принадлежащее къ типу вращающихся. Сердечникъ имѣетъ форму колеса съ тремя спицами. Если мы увеличимъ число спицъ, какъ это показано на фиг. 156, то мы получимъ поле, вращающееся болѣе равномѣрно.

Фиг. 156.

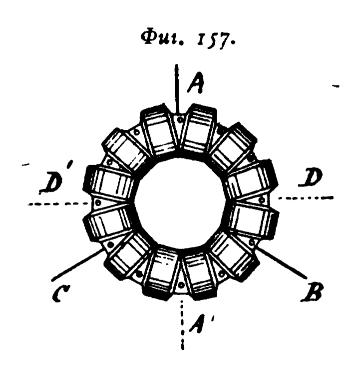


Мы можемъ устроить столько спицъ, сколько желаемъ, и помѣстить на нихъ первичную обмотку. Затѣмъ мы можемъ раздѣлить ободъ колеса тоже на сколько угодно частей и сдѣлать на нихъ вторичную обмотку. Такимъ образомъ мы получаемъ возможность трансформировать систему токовъ сколькихъ угодно фазъ въ другую систему опять таки любаго числа фазъ. Необходимо только, чтобы трансформируемый токъ не былъ однофазнымъ, такъ какъ надо получить въ трансформаторѣ вращающееся поле, а не простое перемѣнное.

Того же результата можно достичь, раздѣливъ ободъ колеса на нѣсколько частей, снабженныхъ первичной обмоткой, и на другое число частей снабженныхъ вторичной обмоткой. Въ этомъ случаѣ спицъ не требуется и все внутреннее пространство колеса можетъ быть заполнено желѣзомъ, кромѣ конечно центральнаго отверстія, нужнаго для помѣщенія проволокъ обмотки. Даже не необходимо имѣть первичную и вторичную обмотки. Если на сердечникѣ сдѣлана одна сплошная обмотка, какъ въ кольцѣ Грамма, и если провода, принадлежащіе одной системѣ токовъ, присоединены къ ней въ нѣсколькихъ симметрично расположенныхъ точкахъ, то возможно получить отъ этой же обмотки систему токовъ другаго числа фазъ, присоединивъ къ ней опять таки въ симметрично расположенныхъ точкахъ другое число проволокъ. Первая попытка такой трансформаціи трехфазныхъ

токовъ въ двухфазные была сдѣлана авторомъ на лекціи, читанной въ *Royal Institution* 23 февр. 1894 г. Именно кольцевой трансформаторъ съ 12 катушками соединенными послѣдовательно, былъ соединенъ въ трехъ равноотстоящихъ другъ отъ друга точкахъ *A*, *B* и *C*, съ проводами, питаемыми трехфазнымъ токомъ (фиг. 157). Присоединяя другіе провода по концамъ любого діаметра напримѣръ въ точкахъ *A* и *A'*, можно было получать простой перемѣнный токъ. Токъ одного напряженія съ первымъ можно было получать съ концовъ другого діаметра *DD'*, перпендикулярнаго къ первому. Такъ какъ въ этомъ случаѣ двухфазныя катушки занимаютъ 180°, а трехфазныя только 120°, то отношеніе напряженій будетъ 1:0,75, такъ какъ напряженія пропорціональны (если распредѣленіе магнитнаго потока по окружности слѣдуетъ закону синусовъ) 1—cos β, гдѣ β есть угловая ширина.

Фиг. 157.

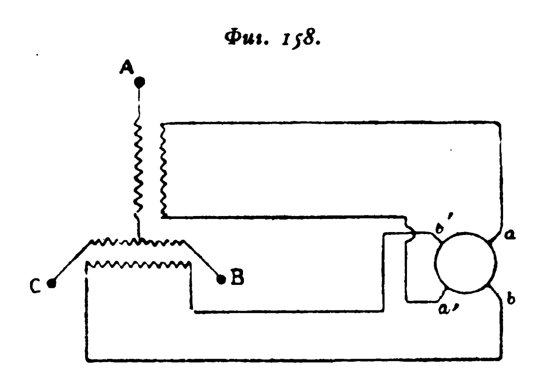


При помощи такого прибора можно получить любую трансформацію фазъ. Магнитная цѣпь значительно улучшается при примѣненіи тщательно раздѣленной желѣзной центральной части, подвижной или неподвижной.

Нѣсколькими днями позже этой лекціи, 1-го марта 1897 г., на собраніи *National Electric Light Association* въ Вашингтонѣ, Скоттъ, главный электрикъ компаніи Вестингауза, предложилъ другое рѣшеніе той же задачи, требующее примѣненія двухъ трансформаторовъ. Вотъ какъ описано приспособленіе для превращенія двухфазнаго тока въ трехфазный: «Первичныя обмотки двухъ трансформаторовъ соединены съ генераторомъ, дающимъ двухфазные токи. Вторичныя электродвижущія силы будутъ конечно, отличаться по фазѣ отъ первичныхъ на 90°. Одна изъ вторичныхъ обмотокъ составлена изъ 100 оборотовъ. Къ ея рединѣ, такъ, чтобы по обѣ стороны оставалось по 50 оборотовъ, присоединена вторичная обмотка второго трансформатора, состоящая изъ 87 оборотовъ, т. е. приблизительно изъ $50 \times \sqrt{3}$ оборотовъ. Три свободные конца (фиг. 158) дадутъ электродвижущія

силы, разнящіяся на 120°. Если электродвижущая сила въ каждой первичной обмоткѣ будетъ равна 1.000 вольтамъ, въ одной из

Фиг. 158.



вторичныхъ 100 вольтамъ, въ другой 87 вольтамъ, то разность потенціаловъ между двумя любыми вторичными зажимами будетъ 100 вольтъ.

Способы трансформаціи однофазныхъ перемѣнныхъ токовъ въ двухъ и трехфазные. Слѣдующій способъ полученія трехфазнаго тока изъ однофазнаго предложилъ Désiré-Korda.

Онъ основанъ въ принципѣ на употребленіи трансформатора съ тремя сердечниками и подвижной катушкой съ самоиндукціей. Цѣпь съ однофазнымъ токомъ $c = C \sin pt$ раздѣляется на двѣ вѣтви I и II, съ одинаковымъ истиннымъ (омическимъ) сопротивленіемъ. Во вторую вѣтвь включается такая катушка съ самоиндукціей, чтобы

$$\frac{Lp}{R} = \sqrt{3} = tang\, 60^0$$

Токъ въ вѣтви I выраженныя формулой:

$$c_1 = \frac{E}{R} Sin\, pt \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

Токъ во вѣтви II формулой.

$$c_2 = \frac{E}{\sqrt{R^2 + p^2 L^2}} Sin\,(pt - \varphi) = \frac{E}{2R} Sin\,(pt - 60^0)\,.$$

т. е. токъ c_2 будетъ равняться половинѣ тока c, пока удовлетворено уравненіе (1). Если вторая вѣтвь состоитъ изъ n витковъ на одномъ изъ сердечниковъ трансформатора, то вѣтвь первая

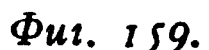
должна состоять только изъ $n/2$ витковъ, помѣщенныхъ на второмъ сердечникѣ, причемъ направленіе витковъ въ двухъ этихъ обмоткахъ должно быть обратно такъ, чтобы они производили въ своихъ сердечникахъ два равные потока, отличающіеся по фазѣ на 120°. На третьемъ сердечникѣ трансформатора находятся витки обѣихъ вѣтвей, причемъ направленіе ихъ токово, что они производятъ третій потокъ, отличающійся отъ двухъ первыхъ на 120°. Такимъ образомъ отъ вторичныхъ обмотокъ, помѣщенныхъ на всѣхъ трехъ сердечникахъ, получаются трехфазные токи.

Способы трансформаціи постоянныхъ токовъ въ многофазные перемѣнные и наоборотъ. Способы преобразованія постоянныхъ токовъ въ простые перемѣнные примѣнимы также и для многофазныхъ токовъ.

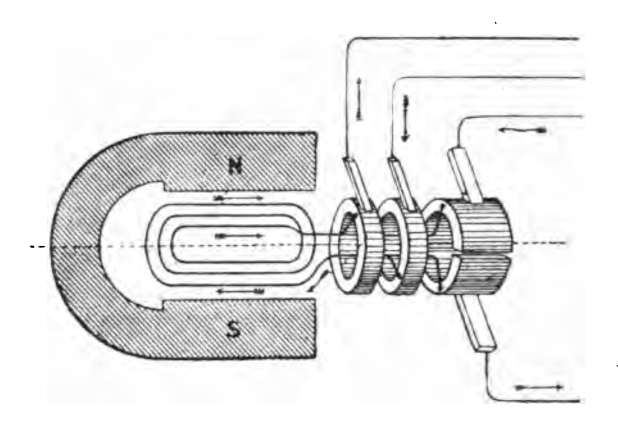
Старѣйшій способъ преобразованія перемѣннаго тока въ постоянный или наоборотъ состоитъ въ соединеніи двухъ машинъ одной постояннаго тока, другой перемѣннаго, изъ которыхъ одна дѣйствуетъ, какъ двигатель, другая, какъ генераторъ. Примѣромъ такого преобразованія можетъ служить установка въ гор. Касселѣ, гдѣ примѣнена трехпроводная система распредѣленія постояннымъ токомъ (съ аккумуляторами). Сѣть питается динамомашинами постояннаго тока, приводимыми во вращеніе синхронными двигателями перемѣннаго тока, питаемыми, въ свою очередь, токомъ высокаго напряженія, получаемымъ издалека.

При другомъ способѣ преобразованія, арматура вращающаяся въ магнитномъ полѣ, получаетъ постоянный токъ, приводящій ее во вращеніе и доставляетъ перемѣнный токъ, черезъ посредство контактныхъ колецъ соединенныхъ соотвѣтственнымъ образомъ съ той же обмоткой арматуры. На фиг. 159 показанъ этотъ способъ преобразованія, который можетъ быть также примѣненъ для обратнаго преобразованія перемѣннаго тока въ постоянный. На чертежѣ вращающаяся арматура изображена въ видѣ простой катушки съ простымъ коммутаторомъ изъ двухъ частей для постояннаго тока, на практикѣ же примѣняются болѣе сложныя арматуры съ коллекторами изъ большого числа пластинъ. Напримѣръ, пользуются обыкновеннымъ кольцомъ Грамма, прибавляя къ нему два контактныхъ кольца, присоединенныхъ къ двумъ точкамъ обмотки, находящимся на концахъ одного и того же діаметра. Такая машина, устроенная Др. Вальм-

слеемъ, существуетъ въ *Finsbury Technical College* съ 1885 года. Она служитъ и трансформаторомъ одного тока въ другой и, если



Фиг. 159.



ее вращать, даетъ токъ перемѣнный или постоянный, или оба одновременно. Въ 1887 году компанія *Helios* взяла патентъ на точно такую комбинацію, а въ 1889 г. Брадлей и Тесла на подобныя же устройства.

Для полученія изъ постояннаго тока трехфазнаго тока, надо имѣть три контактныхъ кольца, соединенныхъ съ тремя симметрично расположенными точками. Для двухфазныхъ токовъ надо четыре кольца, соединенныхъ съ точками, отстоящими на 90°. Въ недавно появившемся приборѣ Гютена и Леблана [1]) восемнадцать контактныхъ колецъ соединены съ различными точками обмотки, давая восемнадцать перемѣнныхъ токовъ, причемъ каждый разнится по фазѣ отъ сосѣдняго на 20°.

Простой вращающійся комбинированный коммутаторъ безъ всякихъ магнитовъ, подобный изображенному на фиг. 159, былъ бы достаточенъ для превращенія постояннаго тока въ перемѣнный и наоборотъ, еслибы не встрѣчалось сильнаго затрудненія въ образованіи множества искръ. Присутствіе электромагнитовъ уравновѣшиваетъ электродвижущія силы въ различныхъ частяхъ обмотокъ и поддерживаетъ вращеніе.

---

[2]) См. *Electricien* 21 Avr. 1894.

На Франкфуртской выставкѣ 1891 г. было нѣсколько вращающихся трансформаторовъ этого рода. Фирмы Шуккерта и Ламейера въ особенности выставили много весьма интересныхъ многофазныхъ приборовъ, въ которыхъ преобладало подобное устройство (см. стр. 115).

Фирма Шуккертъ и К⁰ выставила шестиполюсную машину съ кольцевой арматурой, которая могла трансформировать токъ постоянный, однофазный, двухфазный и трехфазный въ любой изъ трехъ остальныхъ. Она состояла изъ простой кольцевой арматуры съ коллекторомъ изъ 144 пластинъ, секціи которой были въ передней части арматуры соединены между собою параллельно (по извѣстному способу Морди). Такъ какъ обмотка состояла изъ 144 секцій, а индукторъ имѣлъ шесть полюсовъ, то число секцій лежавшихъ между двумя сосѣдними одноименными полюсами было 48. Отъ секцій 1, 17 и 33, т. е. отъ точекъ равноотстоящихъ другъ отъ друга на разстоянія трети пространства занимаемаго обмоткой между двумя сосѣдними одноименными полюсами, шли три проволоки къ тремъ контактнымъ кольцамъ, отъ которыхъ при помощи щетокъ получались уже трехфазные токи. Отъ четырехъ точекъ тоже равноотстоящихъ, т. е. отъ секцій 1, 13, 25 и 37, тоже шли четыре проволоки къ другимъ четыремъ контактнымъ кольцамъ, отъ которыхъ получались двухфазные токи.

Фирма Шуккерта устроила въ Буда-Пештѣ внѣ города станцію, отъ которой около 1.000 киловаттовъ передается помощью двухфазныхъ токовъ въ 2.000 вольтъ на нѣсколько подстанцій, расположенныхъ въ городѣ, гдѣ они трансформируются въ постоянный токъ. Каждый трансформаторъ состоитъ изъ двойной машины, составленной изъ динамомашины постояннаго тока и двигателя перемѣннаго тока, укрѣпленныхъ на одномъ валу. Отдача трансформаціи доходитъ до 85%. Подобнаго же рода установка устроена той же фирмой въ Бильбоа, гдѣ трехфазный генераторъ непосредственно соединенный съ тюрбиной, доставляетъ 46 киловаттовъ передаваемыхъ на станцію, отстоящую, на двѣ мили, на которой трехфазный токъ превращается въ постоянный.

Восьмиполюсный вращающійся трансформаторъ, основанный на томъ же принципѣ, но только съ волнообразной обмоткой, былъ



выставленъ въ Франкфуртѣ компаніей *Allgemeine Geselschaft*. Онъ получалъ постоянный токъ въ 100 вольтъ и трансформировалъ его въ трехфазный въ 70 вольтъ. Въ настоящее время этотъ трансформаторъ находится въ лабораторіи *Technical College Finsbury*.

Госпиталье *) придумалъ классификацію для приборовъ, служащихъ для трансформаціи токовъ одного рода въ токи другого рода, давъ имъ общее названіе *полиморфныхъ* машинъ.

Въ Дублинѣ трамвай, примѣняющій постоянный токъ въ 500 вольтъ, питается энергіей, передаваемой въ видѣ трехфазнаго тока въ 3500 вольтъ. Трансформація совершается при помощи динамо-двигателей, помѣщенныхъ на подстанціяхъ. Каждая машина состоитъ изъ синхроннаго трехфазнаго двигателя, соединеннаго накрѣпко съ генераторомъ постояннаго тока. Всѣ машины доставлены англійской компаніей Томсонъ-Гоустонъ.

Статья о трансформаторахъ не была бы полна, еслибъ мы не упомянули здѣсь о такъ называемыхъ *авто-трансформаторахъ*, примѣняемыхъ тогда, когда на короткое время, требуется небольшая электродвижущая сила какъ напримѣръ для пусканія двигателя въ ходъ. Автотрансформаторы (или «однокатушечные» трансформаторы) состоятъ изъ проволочной катушки, надѣтой на желѣзный сердечникъ и соединенной съ главными проводами. Въ нѣкоторой точкѣ катушки на большемъ или меньшемъ разстояніи отъ конца ея, зависящемъ отъ требуемой электродвижущей силы, присоединено отвѣтвленіе и токъ берется отъ этого отвѣтвленія и одного изъ концовъ. Очевидно, что тутъ можно взять гораздо болѣе сильный токъ, чѣмъ доставляемый катушкѣ, такъ какъ часть между концомъ и отвѣтвленіемъ играетъ роль вторичной обмотки.

Многофазныя реакціонныя катушки. Многофазныя реакціонныя катушки можно устраивать такъ же, какъ и многофазные трансформаторы, устраивая рядъ (двухфазныхъ или трехфазныхъ) обмотокъ на желѣзныхъ сердечникахъ вмѣсто первичной или вторичной катушекъ. При этомъ надо примѣнять обыкновенныя правила устройства реакціонныхъ катушекъ, обращая только вниманіе на фазы.

*) Soc. Franc. de Phys. 1894, p. 203.



ГЛАВА XI.

Измѣреніе энергіи многофазныхъ токовъ.

Какъ извѣстно, энергія, доставляемая перемѣннымъ токомъ въ какой-нибудь части цѣпи, можетъ быть измѣрена различными способами: при помощи ваттметра, по способу трехъ вольтметровъ или по какому-нибудь иному аналогичному способу *).

Въ случаяхъ двухфазной или трехфазной системъ являются нѣкоторыя усложненія. Въ случаѣ, если двѣ или три цѣпи идутъ отдѣльно, то достаточно имѣть въ каждой соотвѣтственный ваттметръ. Вся доставляемая энергія будетъ равна суммѣ отдѣльно измѣренныхъ. Напримѣръ въ трехфазной системѣ, съ соединеніемъ звѣздой или треугольникомъ, отдѣльно можетъ быть измѣрена энергія въ каждой вѣтви цѣпи.

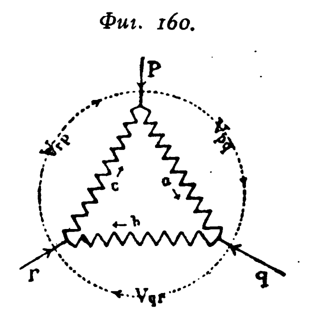
Очевидно, что для случая трехфазнаго двигателя, такой способъ измѣренія былъ бы весьма неудобенъ и можно легко показать, что тутъ можно сдѣлать нѣкоторое упрощеніе.

Въ случаѣ когда между тремя цѣпями существуетъ полная симметрія, очевидно достаточно измѣрить при помощи ваттметра энергію въ одной цѣпи и умножить ее затѣмъ на три. Но вообще на практикѣ нельзя считать, что такая симметрія существуетъ.

Измѣреніе энергіи трехфазнаго тока. Когда мы имѣемъ три тока въ трехъ проводахъ, одинъ изъ которыхъ равенъ суммѣ

*) Объ этихъ способахъ см. *Fleming* «Altern. Current Transformer» или *Блекслей*—«Перемѣнные электрическіе токи», пер. подъ ред. Лебединскаго.

двухъ остальныхъ, и когда мы знаемъ, что такое же соотношеніе существуетъ и для напряженій въ трехъ цѣпяхъ, то очевидно эти шесть величинъ не будутъ независимы другъ отъ друга и поэтому должна существовать возможность измѣрить энергію, не измѣряя всѣхъ шести названныхъ величинъ.



Фиг. 160.

Возьмемъ простой случай трехфазной цѣпи съ лампами накаливанія, соединенными треугольникомъ (фиг. 160). Пусть a, b и c будутъ цѣпи съ лампами. Обозначимъ черезъ a, b и c силы токовъ въ этихъ цѣпяхъ и черезъ V_{pq}, V_{qr} и V_{pr} разности потенціаловъ между ихъ концами. Тогда общее число ваттовъ будетъ:

$$W = a\,V_{pq} + b\,V_{qr} + c\,V_{rp}.$$

Принявъ за положительное направленіе—направленіе, указанное стрѣлками, мы для каждаго момента времени будемъ имѣть:

$$V_{pq} + V_{qr} + V_{rp} = o$$

откуда

$$V_{pq} = -V_{qr} - V_{rp}.$$

Подставляя эту величину въ предыдущее уравненіе, получимъ:

$$W = -a\,V_{qr} - a\,V_{rp} + b\,V_{qr} + c\,V_{rp} = V_{qr}\,(b - a) + V_{rp}\,(c - a).$$

Если черезъ p, q и r мы обозначимъ силы токовъ въ проводахъ, идущихъ къ вершинамъ треугольника, то

$$b - a = q \text{ и } c - a = -p$$

Слѣдовательно

$$W = V_{qr} \,.\, q - V_{rp}\ p.$$

Это выраженіе имѣетъ видъ разности между двумя количествами энергіи, вслѣдствіе выбраннаго нами положительнаго направленія. Если мы измѣнимъ знакъ разности потенціаловъ въ r и p, то такъ какъ $V_{rp} = -V_{pr}$, получимъ

$$W = V_{qr} \,.\, q + V_{rp} \,.\, p.$$

Это значитъ, что если мы пропустимъ токъ q черезъ толстую катушку ваттметра, тонкая катушка котораго присоединена къ

14

точкамъ q и r, и пропустимъ токъ p черезъ толстую катушку второго ваттметра, тонкая катушка котораго соединена съ точками p и r, то сумма ваттовъ, указываемыхъ этими приборами, будетъ равняться всему количеству энергіи, поглощаемому въ цѣпяхъ a, b и c.

Для случая, когда цѣпи соединены звѣздой, можно вывести тоже подобную же формулу. Примѣняя обозначенія, принятыя на фиг. 54 (стр. 50), получимъ для общаго числа ваттовъ выраженіе:

$$W = V_{jm} \cdot a + V_{jn} \cdot b + V_{jo} \cdot c \, .$$

Беря теперь силы токовъ вмѣсто разностей потенціаловъ, какъ мы это дѣлали въ случаѣ соединенія треугольникомъ, можемъ написать:

$$a + b + c = 0 \, .$$

Откуда:

$$a = -b - c \, .$$

Подставляя эту величину a въ предыдущую формулу и замѣчая, что

$$V_{jn} - V_{jm} = V_{mn} \, .$$

и

$$V_{jo} - V_{jm} = V_{mo} \, .$$

получимъ

$$W = V_{mn} \, . \, b + V_{mo} \cdot c$$

Слѣдовательно, опять-таки двухъ ваттметровъ надлежащаго устройства достаточно для измѣренія энергіи. Д-ръ Аронъ [1]) построилъ счетчикъ для измѣренія потребляемой энергіи, устройство котораго представляетъ, видоизмѣненіе хорошо извѣстныхъ счетчиковъ съ дифференціальными сцѣпленіями того же изобрѣтателя. Въ трехфазномъ счетчикѣ колебаніе второго маятника ускоряется двумя подвижными катушками двухъ ваттметровъ, причемъ каждая подвижная катушка находится внутри соотвѣтствующей неподвижной. Другаго рода многофазные счетчики предложены Дунканомъ [2]) и Шалленбергеромъ [3]).

---

[1]) Electrot. Zeit. XIII, 193. April 1892.
[2]) Spec. of. Brit. Pat. 6241 (1893).
[3]) Spec. of. Brit. Pat. 148 (1895).

ГЛАВА XII.

Замѣтки относительно проэктированія двигателей съ вращающимся магнитнымъ полемъ.

Какъ при всякомъ проэктированіи, умѣніе хорошо расчитать двигатель съ вращающимся полемъ даетъ только практика. Все, что можно здѣсь сообщить, это только тѣ общіе принципы, на которыхъ основывается вычисленіе размѣровъ частей и обмотокъ въ каждомъ частномъ случаѣ.

Вотъ задача, которую мы должны рѣшить: Требуется построить двигатель для даннаго числа фазъ и даннаго напряженія питающаго тока. Каковы должны быть размѣры его частей и какая должна быть его обмотка, чтобы онъ могъ доставлять опредѣленное, заданное, количество энергіи?

Начнемъ со статора. Цѣль проводовъ статора (съ точки зрѣнія проэкта) двойная: 1) доставить обратную электродвижущую силу, равную V, т. е. напряженію питающаго тока, и 2) проводить токъ силы, равной $\frac{W}{Vh\cos\varphi}$, гдѣ W — общее число ваттовъ, потребляемое двигателемъ при полной нагрузкѣ и h число цѣпей въ статорѣ. Косинусъ угла отставанія ($\cos\varphi$) можно считать равнымъ 0,85. Напримѣръ въ шести-сильномъ двухфазномъ двигателѣ, изображенномъ на фиг. 106 *bis* предназначенномъ для питанія токами въ 100 вольтъ и подробно описанномъ въ главѣ XIV, при отдачѣ въ 80%, общее число ваттъ, потребляемыхъ при полной нагрузкѣ, равняется 5600. Сила тока въ каждой цѣпи будетъ:

$$\frac{5600}{100 \times 2 \times 0{,}85} = 33 \text{ ампера.}$$

Размѣры статора опредѣляются тѣмъ, что мы должны имѣть (принимая вдобавокъ въ соображеніе относительное пространство, занимаемое мѣдью и желѣзомъ, о которомъ ниже) нѣкоторую опредѣленную длину проводниковъ, выполняющихъ сказанныя цѣли. Полная длина всѣхъ активныхъ проводовъ въ каждой цѣпи можетъ быть вычислена на основаніи уравненія:

$$V - v = \frac{q\mathbf{B}\lambda s}{10^8}$$

гдѣ V — напряженіе питающаго тока въ дѣйствующихъ вольтахъ;
v — вольты, теряемые вслѣдствіе сопротивленія проводниковъ статора (см. ниже),
q — множитель, зависящій отъ угловой ширины катушекъ (см. стр. 27), который можно принять равнымъ 0,9 для двухфазнаго двигателя, подобнаго представленному на фиг. 97 и равнымъ 0,95 для трехфазнаго двигателя; подобнаго изображенному на фиг. 57;
$\mathbf{B}$ — дѣйствующая плотность потока (см. ниже);
λ — требуемая общая длина активныхъ проводовъ;
s — линейная скорость магнитнаго поля въ сант. въ сек.

Потерю вольтъ v можно считать равной 0,05 V въ маленькихъ двитателяхъ и 0,02 V въ двигателхъ въ 100 силъ и больше. Черезъ $\mathbf{B}$ мы обозначили корень квадратный изъ средней ариѳметической квадратовъ плотности потока въ воздушномъ промежуткѣ (междужелѣзномъ пространствѣ). Такъ какъ наибольшая плотность потока не должна превосходить 6000 линій на кв. сант. (что составитъ болѣе 11000 въ желѣзѣ между каналами), то мы можемъ считать въ предыдущемъ уравненіи $\mathbf{B} = \frac{6000}{\sqrt{2}} = 4200$. Что касается s, то относительно ея величины трудно дать какое нибудь общее правило, такъ какъ скорость въ значительной степени зависитъ отъ той цѣли, для которой двигатель предназначается. Линейная скорость периферіи ротора можетъ быть больше чѣмъ допускаемая въ обыкновенныхъ арматурахъ. Для обыкновенныхъ стосильныхъ арматуръ 1500 сант. въ секунду представляетъ обыкновенную скорость, для ротора же ее можно довести свободно до 2400 сант. въ сек. Линейная скорость периферіи мѣняется весьма мало въ зависимости отъ размѣровъ машины,

такъ что скорость въ 2000 сант. въ сек., будетъ весьма хороша для роторовъ машинъ отъ 10 до 100 силъ. Для машинъ весьма большого радіуса она можетъ быть еще увеличена. Скорость магнитнаго поля s бываетъ на 2—5% больше этой, въ зависимости отъ величины сдвига. Радіусъ ротора на основаніи соображеній, которыя будутъ высказаны далѣе, мѣняется почти пропорціонально квадратному корню изъ числа силъ двигателя. Изъ разсмотрѣнія размѣровъ хорошо построенныхъ многофазныхъ двигателей, выходитъ, что формула

$$r = 200\sqrt{\frac{\text{число силъ}}{s}}$$

даетъ длину радіуса (въ сантиметрахъ), могущую служить основаніемъ вычисленій. Эта формула выведена изъ разсмотрѣнія двигателей, предназначенныхъ для токовъ съ частотою около сорока—пятидесяти періодовъ въ секунду. Для большихъ частотъ нѣтъ еще достаточныхъ данныхъ, но такъ какъ теоретически частота тока не вліяетъ на размѣры двигателя, то повидимому общій методъ проектированія, излагаемый здѣсь, пригоденъ и для частотъ до 100 періодовъ въ секунду. Конечно можно допускать значительныя уклоненія отъ длины радіуса, вычисленной по этой формулѣ. Если, напримѣръ, подсчитавъ грубо длину ротора параллельную оси, мы найдемъ, что она слишкомъ велика, то легко взять радіусъ большій, чѣмъ даетъ формула и подсчитать вновь длину. Подходящее число оборотовъ въ секунду, которое мы обозначимъ черезъ n_1, будетъ приблизительно $\frac{320}{r}$. Частоту тока, т. е. число періодовъ въ секунду, мы обозначимъ черезъ n. Число паръ полюсовъ, производимыхъ одной цѣпью статора (по которой проходитъ одинъ изъ многофазныхъ токовъ), равняется $\frac{n}{n_2}$, гдѣ n_2 число оборотовъ поля въ секунду. Отношеніе $\frac{n}{n_2}$ должно быть цѣлое число и мы можемъ взять его равнымъ такому цѣлому числу, при которомъ n_2 было бы по возможности ближе къ $1{,}03n_1$ (допуская сдвигъ въ 3%). Линейная скорость s будетъ тогда $2\pi n_2 r$. Конечно конструкторъ можетъ измѣнить всѣ эти вычисленія на основаніи совершенно особыхъ соображеній, напримѣръ когда у него уже есть запасъ желѣзныхъ штампованныхъ частей, которыя онъ хочетъ пустить въ дѣло.

Вычисливъ s, мы будемъ имѣть всѣ данныя для вычисленія λ, а отъ этой величины и поперечнаго сѣченія проводовъ зависитъ ширина статора.

Діаметръ проводниковъ можетъ быть выбранъ такъ, чтобы плотность тока мѣнялась въ предѣлахъ 250—300 амперъ на квадратный сантиметръ, въ зависимости отъ сорта изоляціи проводовъ и легкости охлажденія. Мы будемъ обозначать черезъ a площадь, занимаемую поперечнымъ сѣченіемъ проводника, включая сюда и изоляцію и пространство, теряемое при обмоткѣ. Теперь мы должны посмотрѣть на сколько частей долженъ быть раздѣленъ активный проводникъ въ каждой цѣпи. Все пространство, которымъ нужно располагать для помѣщенія проводниковъ статора, зависитъ отъ радіальной толщины d (фиг. 105) обмотки. Желательно дѣлать d по возможности малой, такъ какъ чѣмъ больше эта толщина, тѣмъ больше будетъ магнитная утечка. Вообще ее можно дѣлать вдвое больше, чѣмъ діаметръ каналовъ, хотя отъ этого правила можно и отступать, на основаніи какихъ-либо иныхъ соображеній. Мы видѣли, что $\frac{n}{n_2}$ есть число паръ полюсовъ. Зная это число и число фазъ, можно опредѣлить число каналовъ. Напримѣръ, если обмотка сдѣлана такъ, какъ показано на фиг. 171 и число фазъ равняется двумъ, то считая n равнымъ 50 и $n_2 = 5$, получимъ число катушекъ въ каждой цѣпи равнымъ 20, т. е. всего катушекъ будетъ въ обѣихъ цѣпяхъ 40. Вопросъ о томъ сколько каналовъ потребуется для каждой катушки (или для каждой волны, если принята система волнообразной обмотки) рѣшается въ зависимости отъ діаметра статора и числа катушекъ или волнъ. Мы не можемъ ничего сдѣлать лучшаго, какъ слѣдовать примѣру такихъ авторитетовъ, какъ Броунъ и дѣлать разстояніе между каналами равнымъ діаметру самихъ каналовъ. Изъ этого слѣдуетъ, что если обмотка состоитъ изъ небольшого числа катушекъ, какъ напримѣръ въ двухфазномъ двигателѣ, изображенномъ на фиг. 106 *bis* то на каждую катушку придется по нѣсколько каналовъ (четыре на рисункѣ); если же наоборотъ, число катушекъ велико, какъ въ статорѣ на фиг. 171, то на каждую придется всего по два канала. Обмотки слѣдуетъ помѣщать какъ можно ближе къ внутренней поверхности статора.

Опредѣливъ наиболѣе подходящее число каналовъ (g), ширину каждаго равную $\frac{\pi r}{g}$ и взявъ d въ два раза больше этой ширины, получимъ, что площадь сѣченія канала равняется приблизительно $\frac{2\pi^2 r^2}{g^2}$. Отсюда нужно вычесть площадь, занимаемую бумажными трубами или другой изоляціей и тогда получимъ свободную площадь сѣченія A для каждаго канала. Частное $\frac{A}{a}$ дастъ намъ число проводниковъ, которое можно помѣстить въ каждый каналъ, и произведеніе $\frac{g}{h} \times \frac{A}{a}$ общее число проводниковъ въ каждой цѣпи. Отсюда длина каждаго проводника должна быть

$$l \text{ (сант.)} = \lambda \frac{h \cdot a}{g \cdot A}$$

Эта величина дастъ намъ длину статора (по образующей). Можно видѣть, что послѣдняя изъ разсмотрѣнныхъ нами перемѣнныхъ, отъ которой зависитъ пригодность машины для заданнаго напряженія, есть именно длина активныхъ проводниковъ, или, что то же, размѣръ статора параллельно оси. Этотъ размѣръ относительно r можно мѣнять въ значительной степени не вліяя на стоимость двигателя, расчитанную на силу, и на отдачу его. Надо однако замѣтить, что въ большихъ машинахъ онъ всегда бываетъ сравнительно съ r меньше, чѣмъ въ малыхъ. Такъ какъ статоръ строится изъ листовъ желѣза составляемыхъ вмѣстѣ, то механическія причины требуютъ, чтобы длина статора не была бы слишкомъ велика сравнительно съ его радіальной толщиной. Отчасти именно поэтому радіусъ ротора мѣняется какъ квадратный корень изъ числа силъ, а не какъ кубичный корень. Радіальная толщина приблизительно равняется половинѣ ширины одного полюса. То обстоятельство, что отношеніе радіальной ширины d каналовъ статора къ радіусу уменьшается при увеличеніи радіуса, вызываетъ соотвѣтственное увеличеніе длины статора при увеличеніи размѣровъ машины, такъ какъ мощность двигателя строго пропорціональна вѣсу мѣди въ статорѣ.

Опредѣливъ размѣры статора, можно немедленно вычислить и размѣры желѣзной части ротора. Длина пластинчатаго желѣзнаго сердечника, параллельно оси, должна быть та же, что и

длина статора. Воздушный промежутокъ между поверхностями статора и ротора долженъ быть по возможности меньше, т. е. только достаточнымъ для того, чтобы роторъ могъ свободно вращаться. Въ двигателѣ, изображенномъ на фиг. 105, этотъ воздушный промежутокъ, имѣетъ толщину только 0,5 мил. т. е. внутренній діаметръ статора лишь на 1 мил. больше внѣшняго діаметра ротора. Для маленькихъ восьми, четырехъ и шестиполюсныхъ двигателей роторъ строится изъ дисковъ, подобныхъ нарисованному на фиг. 105. Когда число полюсовъ больше, то центральная часть такихъ дисковъ дѣлается безполезна, — поэтому пластинчатому сердечнику ротора придаютъ форму кольца, составляемаго изъ частей, приготовленныхъ изъ листоваго желѣза, скрѣпленныхъ между собою болтами, и укрѣпляютъ его на чугунной части, могущей имѣть форму колеса, какъ на фиг. 170.

Мы видѣли, что желательно, хотя и не абсолютно необходимо, чтобы число проводниковъ на роторѣ не имѣло общихъ множителей съ числомъ каналовъ на статорѣ, такъ чтобы не было какъ при пусканіи въ ходъ, такъ и при вращеніи съ любой скоростью ниже синхронизма, двухъ проводниковъ, которые стремились бы притянуться другъ къ другу. Когда стержни, составляющіе обмотку ротора, предполагается соединить между собою на основаніяхъ ротора толстыми мѣдными полосами, то не представляется никакого труда опредѣлить нужное число этихъ стержней. Напримѣръ, въ двигателѣ, представленномъ на фиг. 105, число каналовъ въ статорѣ равно 40, число же стержней въ роторѣ 37.

Однако же, если стержни ротора предполагается соединить такъ, чтобы они образовали, правильную обмотку съ цѣлью включать въ нее сопротивленіе при пусканіи въ ходъ или съ цѣлью, разсмотрѣнною на стр. 122, то нужно выбирать число стержней нѣсколько осторожнѣе. Если мы, напримѣръ, желаемъ образовать три цѣпи, которыя соединимъ, съ цѣлью вводить сопротивленіе при пусканіи въ ходъ, съ тремя контактными кольцами, помѣщенными на валу, то мы должны раздѣлить пространство, занимаемое однимъ магнитнымъ полюсомъ, на три части 1, 2 и 3. Всѣ проводники въ части 1, находящіеся передъ сѣвернымъ полюсомъ, должны быть соединены съ проводниками

той же части 1, лежащей передъ южнымъ полюсомъ и т. д. Они должны всѣ вмѣстѣ образовать волнообразную обмотку на роторѣ. Проводники въ частяхъ 2 и 3 образуютъ вторую и третью волнообразныя обмотки. Если въ каждой части будетъ одно и то же число проводниковъ y, то все число проводниковъ будетъ $3yp$, гдѣ p число полюсовъ. Это число будетъ вообще имѣть общій множитель съ числомъ каналовъ въ статорѣ, но это обстоятельство само по себѣ не будетъ препятствовать двигателю приходить во вращеніе, если число проводниковъ достаточно велико и, особенно, если числа ихъ помѣщающіяся на ширинѣ одного полюса не соизмѣримы между собой. Напримѣръ, въ двигателѣ, изображенномъ на фиг. 170, число каналовъ въ статорѣ равняется 80, въ роторѣ 180, числа каналовъ же на ширинѣ полюса — 4 и 9.

При опредѣленіи поперечнаго сѣченія стержней, составляющихъ обмотку ротора, надо помнить, что чѣмъ оно больше, тѣмъ больше будетъ отдача двигателя, если только достаточно и пространство занятое желѣзомъ. Однако, нѣтъ никакой выгоды дѣлать общее поперечное сѣченіе обмотокъ ротора большимъ чѣмъ поперечное сѣченіе обмотокъ статора. На практикѣ обыкновенно первое дѣлаютъ даже нѣсколько меньше послѣдняго. Токъ на каждый сантиметръ периферіи въ одной изъ этихъ частей равенъ (если пренебречь намагничивающимъ токомъ) току на сантиметръ периферіи во второй. Такъ какъ проводниками въ роторѣ служатъ сплошные стержни, изолированные весьма слабо, то ихъ можно помѣстить въ гораздо меньшемъ пространствѣ, чѣмъ проводники статора. Поэтому каналы въ роторѣ обыкновенно болѣе, чѣмъ въ половину уже каналовъ въ статорѣ.

ГЛАВА XIII.

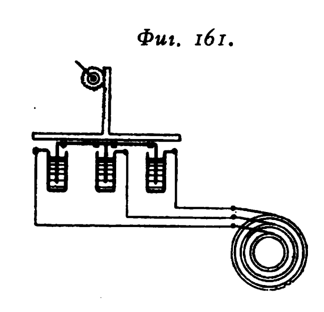
Механическая работа многофазныхъ двигателей.

Три главныхъ требованія, предъявляемыхъ къ двигателю съ механической точки зрѣнія, слѣдующія: 1) двигатель долженъ при началѣ движенія развивать достаточно большой моментъ вращенія; 2) онъ долженъ вращаться съ почти постоянной скоростью при всѣхъ нагрузкахъ, и 3) онъ долженъ превращать въ механическую энергію значительный процентъ поглощаемой электрической энергіи.

Пусканіе въ ходъ многофазныхъ двигателей. Условія, при которыхъ, при началѣ движенія, многофазный двигатель можетъ развить значительный моментъ вращенія, разсмотрѣны въ главѣ VI. Получаемый въ дѣйствительности моментъ конечно зависитъ отъ силы тока, проходящаго по обмоткамъ статора. Онъ можетъ быть въ четыре или пять разъ превосходитъ моментъ, развиваемый при полной нагрузкѣ. Въ случаѣ большихъ двигателей крайне не желательно брать токъ такой силы — какой, проходилъ бы черезъ двигатель, пока тотъ не приметъ нормальной скорости, если его ничѣмъ не уменьшить. Сопротивленіе, вводимое въ обмотку ротора, уменьшаетъ также токъ и въ статорѣ, заставляя его дѣйствовать въ качествѣ реакціонной катушки. Самоиндукція катушекъ статора не будетъ уничтожена

токами въ роторѣ, какъ это случилось бы, если бы не было включено никакого сопротивленія. Въ то же время получается, какъ показано въ главѣ VI, и гораздо большій моментъ вращенія, чѣмъ если бы сила тока была уменьшена сопротивленіемъ, введеннымъ въ первичную цѣпь. На фиг. 161 представленъ реостатъ, состоящій изъ трехъ сосудовъ съ жидкостью, къ которымъ присоединены три провода, идущихъ отъ ротора. Они соединяются вмѣстѣ при помощи трехъ пластинъ, которыя можно опускать и вынимать изъ жидкости, мѣняя такимъ образомъ сопротивленіе реостата. Иногда добавочныя сопротивленія помѣщаются въ самомъ

Фиг. 161.



роторѣ и на валу его дѣлаютъ приспособленіе, выключающее ихъ, когда двигатель достигнетъ нормальной скорости. Для всѣхъ небольшихъ двигателей (до 10 силъ) это приспособленіе предпочтительнѣе, такъ какъ оно дѣлаетъ лишними всѣ усложненія, какъ то: контактныя кольца, щетки и т. п. Большіе двигатели обыкновенно пускаются въ ходъ безъ нагрузки, которая потомъ уже производится постепенно. Для крановъ, элеваторовъ и т. п. дѣлаются спеціальные двигатели безъ всякихъ колецъ, щетокъ и другихъ приспособленій для включенія въ цѣпь ротора добавочныхъ сопротивленій. У нихъ сдвигъ весьма великъ (достигаетъ 12%) и коэффиціентъ мощности малъ, но за то начальный моментъ вращенія вдвое или втрое больше того, который развивается при полной нагрузкѣ. Въ нижеслѣдующей таблицѣ, составленной Колбеномъ, даны силы токовъ и разности потенціаловъ у зажимовъ девяти-сильнаго двигателя, предназначеннаго для подъемнаго крана, построеннаго заводомъ Эрликонъ, при пусканіи его въ ходъ съ разными нагрузками. Усиліе дѣйствующее между арматурой и полемъ не одно и то же при различныхъ положеніяхъ арматуры, поэтому въ таблицѣ даны наибольшій и наименьшій моменты.

Начальные моменты вращеніе девятисильнаго трехфазнаго двигателя для крана.

Вольты между нейтральной точкой и каждымъ зажимомъ.	Амперы въ каждой вѣтви при началѣ движенія.	Усиліе въ килограм. при плечѣ въ 13 сант. при покоѣ.
48,5	60	15 — 30
58	83	30 — 60
69	100	50 — 90
75	105	60 — 100
80	113	60 — 140

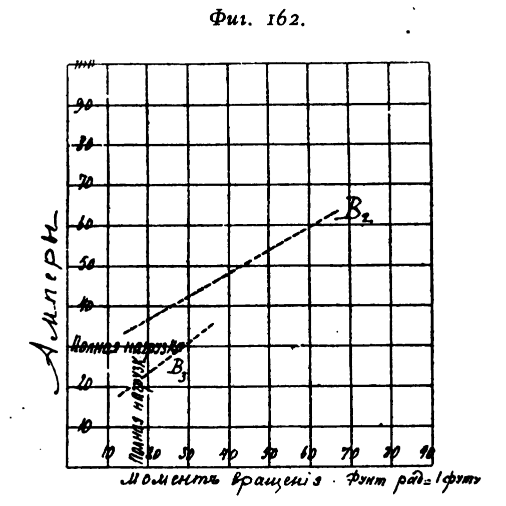
Этотъ же двигатель, работая безъ нагрузки и дѣлая 1000 оборотовъ въ минуту, беретъ 20 амперъ при 110 вольтахъ. При нормальной нагрузкѣ сила тока равняется 39 амперамъ, а скорость 890, причемъ двигатель развиваетъ 8,5 силъ.

Др. Луи Белль въ докладѣ, читанномъ въ Американскомъ Institute of Electrical Engineers, 17-го января 1894 г. [1]) даетъ цѣлый рядъ весьма полезныхъ экспериментальныхъ данныхъ, относительно способности двигателей приходить во вращеніе съ нагрузкой, относительно начальной силы тока, а также и относительно разныхъ другихъ вопросовъ. Кривыя на фиг. 162 взяты изъ этого доклада. Онѣ даютъ начальный моментъ вращенія трехфазнаго пятисильнаго двигателя. Кривая B_2 показываетъ измѣненія момента въ зависимости отъ измѣненія силы тока при данномъ постоянномъ сопротивленіи цѣпи ротора, причемъ напряженіе тока мѣняется, сопротивленіе же подобрано такъ, чтобы моментъ получился большой. Кривая B_3 даетъ ту же зависимость, что и кривая B_2, разница только въ томъ, то сопротивленіе было подобрано такъ, чтобы начальные токи были по возможности слабы. Моментъ, соотвѣтствующій полной нормаль-

[1]) Electr. World XXIII, 344—367, 400 (1894).

ной нагрузкѣ, былъ 17,5 фунтовъ-футъ Можно видѣть, что при началѣ движенія двигатель развиваетъ моментъ вращенія, соотвѣтствующій полной нагрузкѣ при гораздо болѣе слабомъ токѣ,

Фиг. 162.

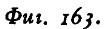


чѣмъ токъ, соотвѣтствующій полной нагрузкѣ. При этомъ послѣднемъ токѣ начальный моментъ вращенія будетъ на 50% больше момента развиваемаго при работѣ тѣмъ же токомъ. Въ цитированномъ докладѣ даны подобнаго же рода кривыя для десятисильнаго двигателя, а также кривыя показывающія вліяніе измѣненія сопротивленія.

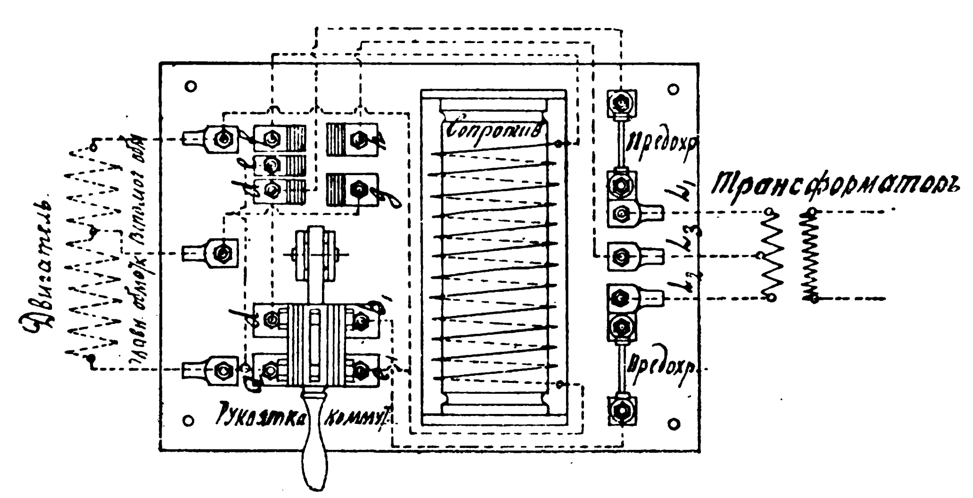
Пусканіе въ ходъ однофазныхъ двигателей. Способы, посредствомъ которыхъ можно пустить въ ходъ однофазный двигатель, могутъ быть раздѣлены на два класса: 1) способы, въ которыхъ при помощи вспомогательныхъ обмотокъ на статорѣ, по которымъ проходитъ токъ, отличающійся по фазѣ отъ главнаго, получается вращающееся поле, и 2) способы, въ которыхъ проводники ротора соединены (напр. при помощи щетокъ и коллектора), такъ что они вызываютъ полярность наклонную къ полярности статора.

Разность фазъ токовъ, проходящихъ по разнымъ обмоткамъ статора, можетъ быть образована или самими обмотками, если у нихъ не равны коэффиціенты самоиндукціи, или же дополнительными сопротивленіями и емкостями, вводимыми послѣдова-

тельно въ одну цѣпь и самоиндуціей, вводимой въ другую цѣпь. Можно также комбинировать эти средства, какъ это сказано на стр. 156. На фиг. 163 изображенъ коммутаціонный приборъ,



Фиг. 163.

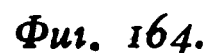


Приборъ Кольбена для пусканія однофазныхъ двигателей.

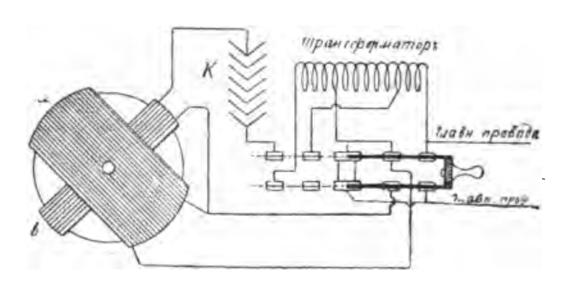
изготовляемый заводомъ Эрликонъ для пусканія въ ходъ двигателей. На рисункѣ ножи коммутатора представлены въ положеніи, соотвѣтствующемъ полному ходу. Когда коммутаторъ находится въ положеніи соотвѣтствующемъ началу движенія, ножи его соединяютъ между собою части *d*, *e* и *f*, а также часть *g* съ частью *h*. Точки L_1 и L_2 получаютъ полное напряженіе отъ трансформатора, точка же L_3 соединена съ серединой вторичной обмотки трансформатора такимъ образомъ, что между точками L_1 и L_3 разность потенціаловъ меньше, чѣмъ между точками L_1 и L_2, но зато тутъ можно взять токъ большей силы, не увеличивая значительно тока въ первичной цѣпи. Когда коммутаторъ находится въ положеніи, соотвѣтствующемъ началу движенія, токъ пройдя отъ L_1 до *d*, имѣетъ далѣе два пути, одинъ черезъ *e* въ главную обмотку, другой черезъ *f* въ катушку съ сопротивленіемъ и добавочную обмотку, откуда онъ возвращается

черезъ контакты *g* и *h* къ точкѣ L_1. Когда двигатель приметъ нормальную скорость, коммутаторъ перекладываютъ назадъ, такъ что его ножи соединяютъ контакты *a* съ *d* и *c* съ *b*. Тогда, какъ видно, обѣ обмотки будутъ соединены послѣдовательно и будутъ получать все напряженіе доставляемое трансформаторомъ.

На фиг. 164 схематически представленъ способъ Броуна пусканія въ ходъ двигателей при помощи электрическаго конденсатора (см. стр. 177), обозначеннаго не чертежѣ буквой *K*. Тонкая пунктирная линія показываетъ соединенія при пусканіи въ ходъ, толстая же линія—соединенія при полномъ ходѣ. Когда двигателемъ не пользуются, рукоятку коммутатора ставятъ вертикально. Катушка *a* изображаетъ рабочую обмотку, катушка *b*—вспомогательную, которая разъ двигатель пришелъ въ движеніе, выключается совсѣмъ. На чертежѣ изображенъ также автотрансформаторъ (см. стр. 207).



Фиг. 164.



Приборъ Броуна для пусканія двигателей.

Въ патентѣ № 24098 за декабрь 1892 г. Броунъ описываетъ нѣсколько различныхъ способовъ пусканія двигателей въ ходъ, между которыми есть способы, требующіе вспомогательныхъ обмотокъ съ самоиндукціей, конденсаторовъ и т. п., а также и способы, принадлежащіе ко второму изъ упомянутыхъ выше классовъ. При примѣненіи послѣднихъ роторъ снабжается обмоткой подобной обмоткѣ арматуръ Грамма или Сименса, соединенной съ коллекторомъ совершенно такъ же, какъ въ машинахъ постояннаго тока. Двѣ противуположныя точки обмотки соединяются кромѣ того съ двумя контактными кольцами. Когда нужно пустить

двигатель въ ходъ, между щетками, касающимися этихъ колецъ включается сопротивленіе, щетки же касающіяся коллектора помѣщаются такъ, чтобы онѣ замыкали на себя нѣсколько витковъ обмотки ротора, помѣщающихся наклонно относительно направленія перемѣннаго потока, создаваемаго статоромъ. Сильный токъ, образующійся въ замкнутыхъ виткахъ заставляетъ ихъ повернуться такъ, чтобы стать параллельными перемѣнному потоку. Такъ какъ щетки не мѣняютъ своего положенія, то получается постоянно вращающее усиліе. Когда двигатель получитъ нормальную скорость, щетки, можно перемѣстить такъ, чтобы онѣ стали діаметрально противуположны. Тогда замыкаютъ на себя и щетки касающіяся контактныхъ колецъ. Броунъ описываетъ также нѣсколько способовъ пусканія въ ходъ, въ которыхъ перемѣнный токъ изъ питающихъ проводовъ пропускается въ роторъ черезъ коммутаторъ.

Постоянство скорости вращенія. Что касается постоянства скорости вращенія, то оно въ хорошихъ двигателяхъ вполнѣ достигается. Дѣйствительно вы видѣли, что въ хорошо спроектированныхъ двигателяхъ сдвигъ не превосходитъ 5% при полной нагрузкѣ, такъ что скорость вращенія можетъ мѣняться только на 2 — 4% при отсутствіи нагрузки и при полной нагрузкѣ. Въ одномъ случаѣ, цитируемомъ Др. Луи Беллемъ, въ установкѣ изъ 17 двигателей съ вращающимся полемъ (въ Колумбіи) наибольшее измѣненіе скорости, при измѣненіи нагрузки отъ 75 силъ до нуля, было только въ 2,2%, причемъ въ нѣкоторыхъ двигателяхъ это измѣненіе было всего въ 1½%. Мѣнять скорость многофазнаго двигателя можно, включая въ главную цѣпь реостатъ.

Отдача. О значительной отдачѣ многофазныхъ и однофазныхъ ассинхронныхъ двигателей можно судить по числамъ, собраннымъ въ прилагаемыхъ таблицахъ.

Первую изъ нихъ, касающуюся нѣсколькихъ трехфазныхъ индукціонныхъ двигателей, построенныхъ заводомъ Эрликонъ составилъ Кольбенъ. Названные двигатели не имѣютъ ни контактныхъ колецъ, ни щетокъ, такъ какъ въ цѣпь ротора не включаются сопротивленія. Всѣ роторы имѣютъ барабанную обмотку въ 3, 5, 7 и 11 частей, замкнутыхъ на себя.

Результаты измѣреній нажимомъ работы трехфазныхъ двигателей Эрликонъ.

Типъ №	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368
Дѣйствит. силъ на шкивѣ	1/4	1/2	3/4	1 1/2	2	3	4 1/2	6	9	12	18	24	36	48	60	75	100	125
Число оборотовъ въ минуту безъ нагрузки	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1000	1000	1000	1000	1000	1000	750	750	600	600	500
Число оборотовъ въ минуту при 1/2 нагрузки	1460	1470	1470	1475	1475	1480	1480	985	985	988	990	990	990	740	742	595	596	496
Число оборотовъ въ минуту при полной нагрузкѣ	1410	1420	1435	1440	1445	1450	1450	960	960	970	970	970	970	725	730	585	588	488
Электродвижущая сила у зажимовъ (соед. звѣздой) въ вольт.	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190
Частота	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Въ каждой вѣтви: Сила тока безъ нагрузки (амперы)	0,85	1,3	2,2	2,8	3,6	6	7,5	12	14	19	21	25	27	40	48	65	75	90
Въ каждой вѣтви: Сила тока при 1/2 нагрузки (амперы)	1	1,4	2,6	3,7	4,8	8	11	16	19	25	32	41	53	73	90	115	143	180
Въ каждой вѣтви: Сила тока при полной нагрузкѣ (амперы)	1,5	2,3	3,3	5,8	7,5	11	14,5	20,5	28	35,5	53	70	100	130	160	200	265	330
Отдача ири полн. нагр. въ %	55	65	68	72	75	78	80	82	87	88	90	91	92	92	93	93	93	94
Косинусъ угла между электродвижущей силой и силой тока (коэффиц. мощности)	0,67	0,75	0,75	0,8	0,8	0,8	0,86	0,8	0,82	0,85	0,85	0,85	0,88	0,9	0.9	0,9	0,91	0,91
Число полюсовъ	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6	8	8	10	10	12
Сила тока при началѣ движенія съ натянутыми ремнями и при малой нагрузкѣ (амперы)	4	6	11	16	30	36	55	65	75	80	85	90	100	105	112	120	150	220
	Включаются безъ добав. сопрот. (351–354)				Пускаются въ ходъ съ обыкновеннымъ реостатомъ въ первичной цѣпи. (355–362)								Требуютъ для пусканія спеціальнаго приспособленія съ автотрансформаторомъ. (363–368)					

Изслѣдованія трехфазныхъ двигателей, произведенныя Кольбеномъ.

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	
Число силъ измѣренныхъ нажимомъ на шкивѣ арматуры.	Число ваттъ эквивал. дѣйствит. силамъ т. е. 736× число дѣйств. силъ.	Сила тока въ каждой вѣтви въ амперахъ.	Вольты между нейтральной точкой и каждымъ зажимомъ.	Кажущіяся ватты 3×вольт. ×амперы.	Истинные ватты измѣрен. у зажимовъ двигателя ваттметрами.	Коэффиціентъ мощности=cos угла отставанія.	Сдвигъ при половинѣ нагрузки въ %.	Отдача т. е. ватты II / ватты VI.	
60	44160	318	60	57240	48300	0,844	2	0,91	Двигатель I. Теоретич. скорость 750 обор. въ мин. Арматура въ видѣ бѣличьяго колеса. Построенъ на заводѣ Al. El. Ges.
42	30910	252	60	45360	36800	0,81	1,3	0,84	
20	14720	150	60	27000	17700	0,665	—	0,83	
0	0	125	60	22500	—	—	—	—	
53,8	39600	180	93	50220	42100	0,84	4	0,94	Двигатель II. Теоретич. скорость 750 обор. въ мин. Барабанная обмотка съ 11 секціями, замкнутыми каждая на себя. Построенъ на заводѣ Эрликонъ.
46	33900	158	95	45000	37440	0,83	3	0,905	
0	0	40	98	11760	1710	0,145	0	—	

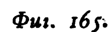
Каппъ въ своей книгѣ «Электрическая передача энергіи» приводитъ нѣсколько данныхъ относительно двухъ трехфазныхъ двигателей, надъ которыми Кольбенъ сдѣлалъ нѣсколько измѣреній при помощи нажима. Эти данныя помѣщены въ вышеприведенной таблицѣ.

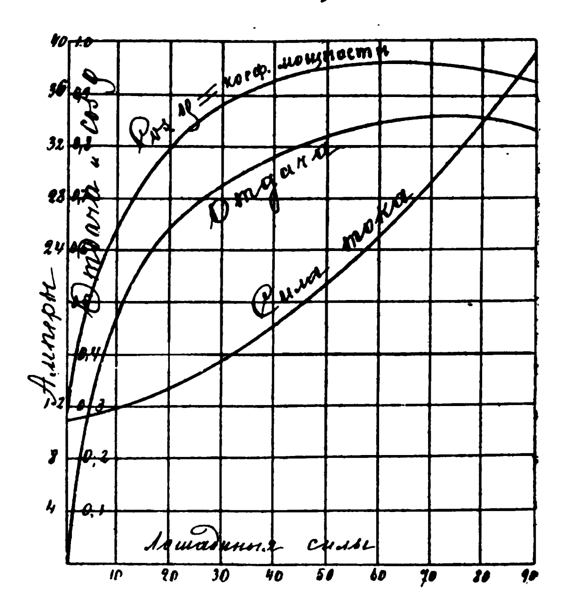
Слѣдующія данныя, наконецъ, относятся къ двигателямъ различныхъ размѣровъ, которые строитъ *Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft*.

Т и п ъ.	D.R.1	D.R.5	D. R. 10.	D. R. 50.	D.R. 500.
Нормальное число силъ . .	1/8	1/2	1	2	50
Число полюсовъ	2	4	4	4	8
Вѣсъ въ килограммахъ . . .	18	65	94	245	1200
Сила тока въ каждой цѣпи при пусканіи	—	—	20	50	400
Сила тока въ каждой цѣпи при полной нагрузкѣ . .	1,4	4	8	36	280
Сила тока въ каждой цѣпи безъ нагрузки	—	—	4,5	15	150
Число поглощаемыхъ киловат. при полной нагрузкѣ	0,23	0,52	0,985	4,38	40,2
Число оборотовъ въ минуту при полной нагрузкѣ . .	2300	1400	1375	1395	725
Тоже безъ нагрузки	2380	1490	1490	1490	745
Число оборотовъ поля . .	3000	1500	1500	1500	750
Сдвигъ при полной нагрузкѣ.	23%	66%	8%	7%	3,3%
Промышленная отдача . . .	—	0,71	0,75	0,84	0,91
Моментъ вращенія въ м.-кил.	—	—	0,52	2,6	49,4

Весьма интересное сравненіе было сдѣлано Кольбеномъ между 80 сильнымъ синхроннымъ двигателемъ перемѣннаго тока, приводившимъ въ движеніе мельницу и 100 сильнымъ асинхроннымъ двигателемъ, установленнымъ на прядильной фабрикѣ. Результаты этого сравненія изображены кривыми на фиг. 165 и 166.

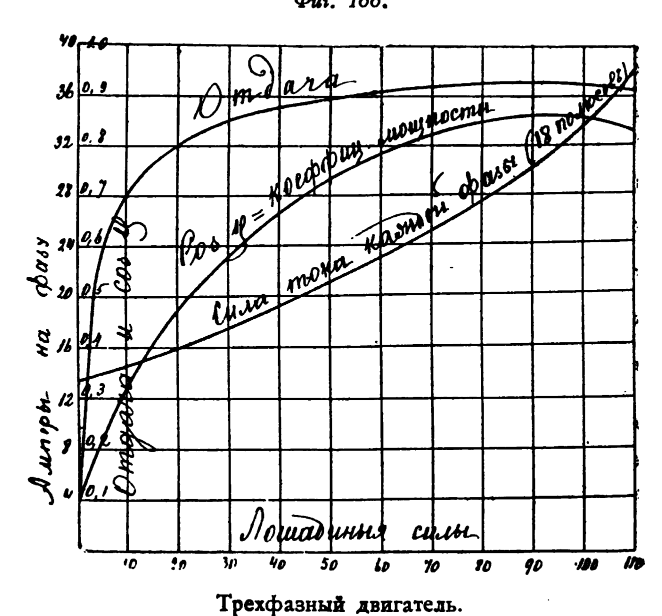
*


Фиг. 165.



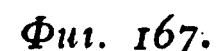
Синхронный двигатель.

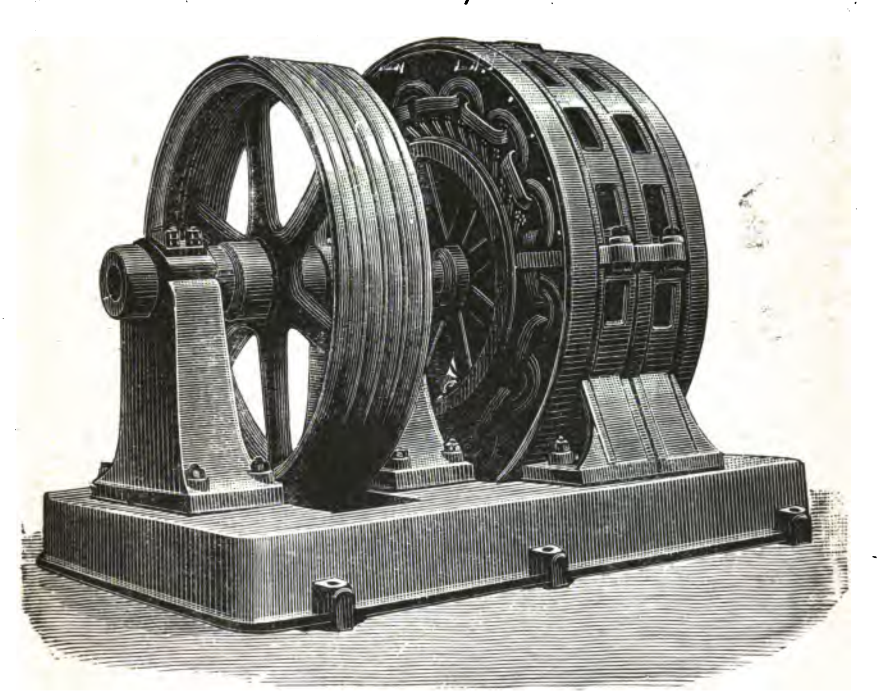
Фиг. 166.



Трехфазный двигатель.

Синхронный двигатель былъ типа Каппа съ арматурой въ видѣ плоскаго кольца, построенный заводомъ Эрликонъ. Онъ былъ расчитанъ на 2.000 вольтъ и на валу его былъ непосредственно укрѣпленъ возбудитель. Кривая его электродвижущей силы почти что синусоида.


Фиг. 167.



18 полюсный трехфазный двигатель высокаго напряженія.

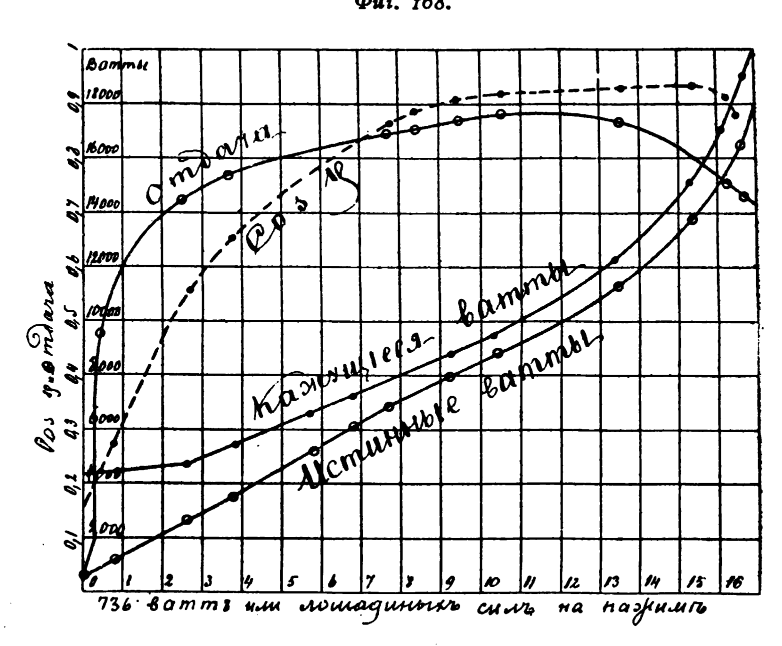
Асинхронный двигатель, изображенный на фиг. 167, былъ 18 полюсный трехфазный двигатель высокаго напряженія, построенный тѣмъ же заводомъ и расчитанный на 1.730 вольтъ, и 50 періодовъ въ секунду. Онъ былъ приспособленъ для канатной передачи, съ малой скоростью, всего 320 оборотовъ въ минуту.

Изъ кривыхъ видно, что коэффиціентъ мощности при всякихъ нагрузкахъ больше у синхроннаго двигателя, чѣмъ у асинхроннаго,

хотя при полной нагрузкѣ разницаа между ними мала (0,94 у перваго и 0,86 у второго). Эта разница, напримѣръ, при потерѣ въ линіи 5% будетъ едва причинять въ проводникахъ добавочную потерю въ $^1/_2$%. Съ другой стороны, отдача асинхроннаго двигателя при всѣхъ нагрузкахъ больше: кривая отдачи для этого двигателя похожа на кривую отдачи хорошихъ трансформаторовъ. При полной нагрузкѣ она превышаетъ 91%, тогда какъ отдача синхроннаго двигателя при полной нагрузкѣ только 86%. Количество энергіи, затрачиваемое на возбужденіе, включая сюда и потери въ возбудителѣ, вызываютъ въ этомъ послѣднемъ уменьшеніе отдачи, особенно замѣтное при малыхъ нагрузкахъ.

Отдача однофазнаго асинхроннаго шести полюснаго 15 силь-

Фиг. 168.



наго двигателя Броуна была измѣрена Рикардо Арно [1]). Двигатель былъ построенъ для частоты въ 40 періодовъ въ секунду,

1) *L'Electtricista* III, № 7, p. 149.

но во время изслѣдованій пользовались токомъ нѣсколько большей частоты. Скорость двигателя мѣнялась отъ 876 оборотовъ, при отсутствіи нагрузки, до 850 оборотовъ, при полной нагрузкѣ. Коэффиціентъ мощности и число ваттовъ, истинныхъ и кажущихся, потреблявшихся двигателемъ при разныхъ нагрузкахъ, указаны на чертежѣ (фиг. 168).

Бушеро [2]) приводитъ сдѣдующіе результаты испытанія двухъ двухфазныхъ двигателей построенныхъ заводомъ Вейеръ и Ричмондъ въ Пантенѣ (близъ Парижа). Одинъ изъ нихъ былъ въ 2—3 силы и вѣсилъ 120 килограммовъ. При 1.125 оборотахъ въ минуту, его отдача была 76%. Другой двигатель, бо́льшихъ размѣровъ, въ 17—20 силъ, вѣсилъ 520 килограммовъ и при 770 оборотахъ въ минуту обладалъ отдачей въ 90%.

Одинъ 50-сильный двухфазный двигатель Тесла построенный и испытанный [3]) въ мастерскихъ Компаніи Вестингауза, вращался со скоростью 750 оборотовъ въ минуту при питаніи токомъ въ 220 вольтъ частота котораго равнялась 25 періодамъ, въ секунду. Скорость вращенія мѣнялась лишь на 2% при работѣ безъ нагрузки и работѣ при полной нагрузкѣ. Отдача была 84% при нагрузкѣ въ $\frac{1}{4}$ полной и 89,5% при полной. Наибольшій начальный моментъ вращенія былъ въ 2,5 раза больше момента при полной нагрузкѣ; при введеніи же во вторичную цѣпь реостата всего въ 1,5 раза. Такъ какъ отдача этого двигателя при малой нагрузкѣ велика, то будетъ онъ самымъ экономичнымъ двигателемъ тамъ, гдѣ двигатель долженъ работать весь день при сильно измѣняющихся нагрузкахъ. Когда этотъ двигатель вращается безъ нагрузки, то онъ потребляетъ почти «безваттный» токъ въ 62 ампера.

Др. Луи Белль въ своемъ докладѣ, о которомъ мы уже упоминали, приводитъ слѣдующія данныя относительно вѣса Американскихъ двигателей съ вращающимся полемъ разсчитаннаго на одну силу.

---

[2]) Bull. de la Soc. Intern. des Electric. XI, 482, Dèc. 1894.

[3]) Electricity (U. S. A) May 15, 1895.

Мощность.	Вѣсъ въ килограммахъ на силу *).
5	46,7
10	28,9
15	30,8
20	33,1 (6-полюсный).
100	29,9 (8-полюсный).

Слѣдующія данныя относительно вѣса на силу относятся къ двигателямъ Европейской фабрикаціи:

Мощность.	Вѣсъ въ килограммахъ. на силу.
2	54.4
6	45,4
13	39,9
50	31,8
70	29,9
100	26,3

Эти данныя совершенно согласуются съ данными для двигателей постояннаго тока; обыкновенный 100 сильный двигатель постояннаго тока рѣдко вѣситъ меньше 36 килограммовъ на силу. Каппъ показалъ, что отдача установокъ съ трехфазными токами выше, чѣмъ отдача установокъ съ двухфазными; мощность первой при томъ же вѣсѣ двигателей относится къ мощности послѣдней какъ 111 къ 100.

---

*) Въ подлинникѣ вѣса даны въ фунтахъ.

(Пр. пер.).

ГЛАВА XIV.

Нѣсколько типовъ современныхъ многофазныхъ двигателей.

Благодарая любезности двухъ фирмъ, шедшихъ всегда впереди другихъ въ дѣлѣ развитія многофазныхъ двигателей, авторъ можетъ помѣстить здѣсь описаніе нѣсколькихъ новѣйшихъ машинъ этого класса.

Двигатели машиностроительнаго завода Эрликонъ (въ Цюрихѣ). Съ осени 1891 года заводъ Эрликонъ непрерывно продолжаетъ совершенствовать двигатели съ вращающимся полемъ и построилъ съ тѣхъ поръ нѣсколько сотъ такихъ двигателей различныхъ размѣровъ. Во всѣхъ двигателяхъ малыхъ размѣровъ, какъ трехфазныхъ, такъ и однофазныхъ, роторъ имѣетъ простую форму бѣличьяго колеса; для двигателей же большихъ размѣровъ примѣняются роторы съ обмоткой, позволяющей включать при пусканіи въ ходъ двигателя добавочныя сопротивленія. Къ іюлю 1892 г. инженеры этой фирмы усовершенствовали разныя детали устройства двигателей настолько, что могли построить трехсильный четырехполюсный трехфазный двитатель, имѣвшій отдачу вь 71%. Заводъ принялъ для всѣхъ своихъ машинъ одну постоянную частоту въ 50 періодовъ въ секунду. Большіе двигатели обыкновенно снабжаются холостымъ шкивомъ позволящимъ пускать ихъ въ ходъ безъ нагрузки, съ цѣлью избѣжать слишкомъ большаго усиленія тока, такъ какъ условіе имѣть большую отдачу при полной нагрузкѣ и при маломъ сдвигѣ, причиняетъ то, что начальный моментъ бываетъ малъ.

Однако, для крановъ, элеваторовъ и т. п. заводъ строитъ специальные двигатели (тоже безъ контактныхъ колецъ и щетокъ), со сдвигомъ при полной нагрузкѣ въ 12%. Ихъ коэффиціентъ мощности поэтому малъ, но зато ихъ начальный моментъ вращенія вдвое и втрое больше момента, соотвѣтствующаго полной нагрузкѣ. Нѣкоторыя данныя относительно одного этихъ двигателей были даны на стр. 221.

Объ однофазныхъ двигателяхъ этого завода и приспособленіяхъ для пусканія ихъ въ ходъ мы тоже уже говорили выше.

Всѣ мастерскія завода Эрликонъ приводятся въ движеніе насчетъ электрической энергіи, передаваемой отъ водопада въ Гохфельденѣ близъ Булаха, отстоящаго отъ завода на 23 километра. Трехфазныя машины, посредствомъ которыхъ совершается передача, были первыми машинми этого рода. Установка состоитъ изъ трехъ трехфазныхъ генераторовъ, каждый въ 200 силъ. Эти генераторы изображены на фиг. 44 стр. 41. Они были спроэктированы Броуномъ осенью 1890 г. одновременно съ машинами служившими для знаменитой Франкфуртской передачи 1891 года. Въ Цюрихѣ существуетъ еще одна подобнаго же рода передача въ 300 силъ отъ водопада Киллвангена, отстоящаго почти на 20 километровъ. Энергія при помощи воздушныхъ проводовъ распредѣляется между большимъ числомъ маленькихъ двигателей. Въ С.-Этьенѣ, въ Франціи, устроена подобная же передача 1.000 силъ, а въ Вангенѣ, въ Вюртембергѣ—въ 350 силъ.

Двигатели завода Броунъ, Бовери и К°. На стр. 133 было сказано нѣсколько словъ относительно первыхъ работъ Броуна. Его фирма съ 1892 г. устроила много многофазныхъ передачъ, приготовивъ для нихъ какъ генераторы, такъ и двигатели. Благодаря любезности фирмы, мы можемъ описать здѣсь детально нѣсколько новѣйшихъ ея двигателей.

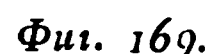
На фиг. 106bis изображенъ боковой видъ двухфазнаго двигателя, могущаго доставлять 6 силъ. Рядомъ изображено и сѣченіе двигателя вертикальной плоскостью параллельной оси. Части, изъ которыхъ приготовлены сердечники ротора и статора, показаны на фиг. 105. Обмотка статора произведена такъ, какъ описано на стр. 37, причемъ концы катушекъ поочередно загнуты въ бока и согнуты на основаніяхъ дугой. Въ

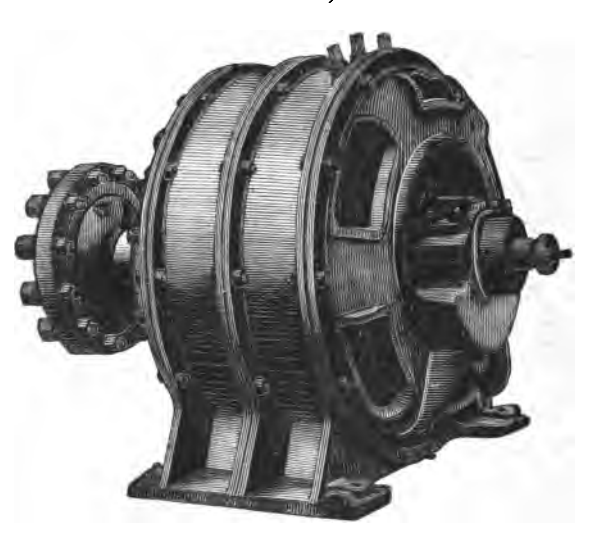
этомъ двигателѣ, предназначенномъ для 100 вольтъ и частоты въ 40 періодовъ въ секунду, въ каждомъ изъ 40 каналовъ статора помѣщается 9 проволокъ въ 3,8 милим. въ діаметрѣ. Въ роторѣ помѣщено 37 круглыхъ мѣдныхъ стержней каждый въ 9 мил. въ діаметрѣ, соединенныхъ между собою на основаніяхъ ротора толстой мѣдной лентой, которая, будучи хорошимъ проводникомъ, въ то же время имѣетъ большую поверхность охлажденія. Воздушный промежутокъ между статорами и роторомъ имѣетъ толщину всего въ 0,5 мил. Наибольшая величина **B** въ желѣзѣ между каналами равняется 11.500, въ желѣзѣ же позади каналовъ—7.500. На этомъ остовѣ можно было бы сдѣлать обмотку и для однофазнаго двигателя, который давалъ бы 4 силы. Изъ чертежа видно, что подшипники взяты съ автоматической смазкой. Вотъ размѣры главнѣйшихъ частей двигателя:

Діаметръ ротора	24,9	сантиметра.
Внутренній діаметръ статора . . .	25,0	»
Радіальная толщина статора	7,0	»
Ширина основанія статора.	11,5	»
Радіальная вышина каналовъ. . . .	2,5	»
Ширина каналовъ	1,0	»
Средняя толщина желѣза между каналами	1,0	»
Діаметръ каналовъ въ роторѣ . . .	1,0	»
Діаметръ стержней въ роторѣ . . .	0,9	»
Сѣченіе стержней въ роторѣ . . .	0,64	квадр. сант.
Сѣченіе проводниковъ въ статорѣ .	0,13	»
Число проводниковъ въ каждомъ каналѣ	9	

На фиг. 106ter и 169 изображенъ двигатель другой формы, который, въ зависимости отъ цѣли, для которой онъ предназначается, снабжается различнаго рода обмотками. На фиг. 106ter представленъ трехфазный двигатель, питаемый непосредственно токомъ высокаго напряженія въ 5.000 вольтъ, частотою въ 40 періодовъ въ секунду. Двигатель дѣлаетъ 500 оборотовъ въ минуту. Его мощность равна 600 силамъ, высота 120 сант. (около 4 футовъ), наружная длина (съ подшипниками) нѣсколько

меньше. Діаметръ ротора равняется 75 сант., длина же его параллельно оси немногимъ меньше 75 сант., Въ сердечникѣ ротора высверлены 96 каналовъ, сквозь которые продѣты мѣдные изолированные проводники, соединенные волнообразно такъ, что они образуютъ звѣзду съ тремя вѣтвями. Внѣшніе концы этой звѣзды проходятъ черезъ каналъ внутрь вала и соединяются съ тремя контактными кольцами, позволяющими при пусканіи въ ходъ включать въ цѣпь ротора дополнительное сопротивленіе. Въ сердечникѣ статора высверлено 48 каналовъ, сквозь которые продѣты проводники, составляющіе обмотку. Изолированы они отъ желѣза толстыми трубками изъ обработанной особеннымъ образомъ бумаги. Способъ соединенія этихъ проводниковъ съ цѣлью получить четырехполюсное поле показанъ на фиг. 40. Описываемый двигатель приходитъ въ движеніе при полной нагрузкѣ, потребляя приэтомъ токъ болѣе слабый, чѣмъ соотвѣтствующій при нормальной работѣ полной нагрузкѣ.


Фиг. 169.

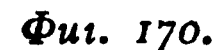


120 сильный трехфазный двигатель Броуна.

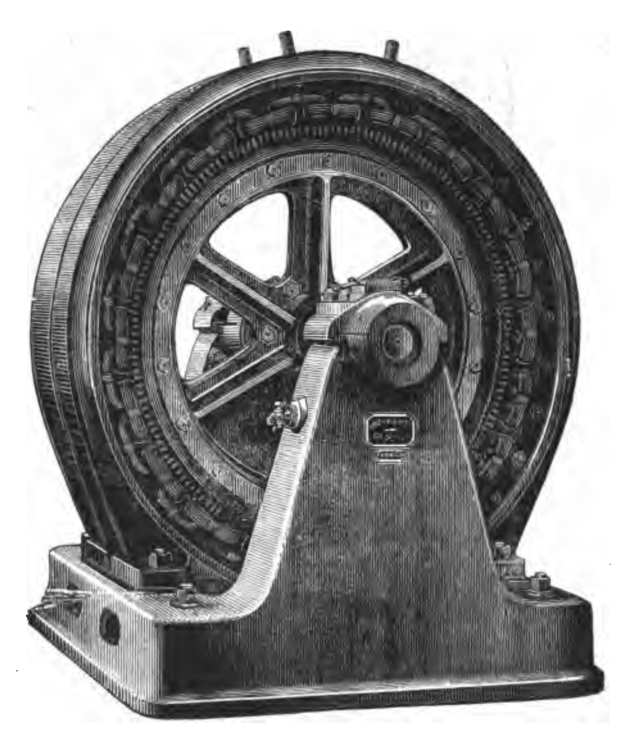
На фиг. 169 представленъ двигатель, съ тѣмъ же желѣзнымъ остовомъ только снабженный обмоткой для двухфазнаго тока въ 2.000

вольтъ. Его мощность равняется 120 силамъ. Сопротивленія, служащія для пусканія въ ходъ помѣщены въ немъ внутри ротора, который снабженъ простымъ механизмомъ, выступающимъ изъ конца вала и позволяющимъ выключать эти сопротивленія, когда двигатель придетъ въ движеніе. Это приспособленіе видно въ правой стороны рисунка фиг. 169.

На фиг. 170 и 171 изображенъ другой 100-сильный двух-



Фиг. 170.



Стосильный тихоходный двухфазный двигатель Броуна.

фазный двигатель иного устройства, который та же фирма строитъ для случаевъ, когда требуется двигатель тихоходный, т. е. дѣлающій малое число оборотовъ въ минуту. Этотъ двигатель, питаемый токомъ въ 2000 вольтъ и съ частотой въ 38 періодовъ въ секунду, дѣлаетъ 200 оборотовъ въ минуту. Измѣренія нажи-

момъ показали что онъ можетъ развить 200 силъ раньше, чѣмъ остановится. Обмотка статора и способъ соединенія концовъ катушекъ ее составляющихъ видны на фиг. 171. Способъ обмотки

Фиг. 171.



Статоръ тихоходнаго двухфазнаго двигателя Броуна.

тутъ принятъ тотъ, который показанъ на фиг. 124. Каждая катушка состоитъ изъ 28 витковъ. Катушекъ всего 40 (по двадцати въ каждой цѣпи), помѣщающихся въ 80 каналахъ. Въ роторѣ всего 180 проводниковъ, соединенныхъ въ три цѣпи, концы которыхъ выведены къ контактнымъ кольцамъ, позволяющимъ вводить въ цѣпь добавочное сопротивленіе. Двигатели того же типа дѣлаются и для обыкновенныхъ однофазныхъ токовъ, и при 2.700 вольтахъ даютъ 120 силъ дѣлая 300 оборотовъ въ минуту.

Двигатели Броуна въ настоящее время очень часто примѣняются для распредѣленія энергіи на заводахъ, гдѣ трехфазные токи особенно удобны. Объ одной изъ большихъ установокъ этого рода въ Шененвертѣ, около Ааро, уже было говорено на стр. 40.

Другимъ примѣромъ можетъ служить двухфазное распредѣ-

леніе въ громадныхъ мастерскихъ машиностроительнаго завода Вейеръ и Ричмондъ въ Пантенѣ, около Парижа. На этомъ заводѣ прежде было установлено три отдѣльныя паровыя машины въ 200, 80 и 50 силъ. Въ настоящее время онѣ замѣнены одной 200-сильной горизонтальной паровой машиной (могущей развивать до 400 силъ), дѣлающей 60 оборотовъ въ минуту. Эта машина вращаетъ три двухфазныхъ генератора, каждый въ 88 киловаттовъ, имѣющихъ вращающіяся арматуры съ барабанной обмоткой и неподвижные восьмиполюсные индукторы. Частота доставляемаго ими тока равняется 40 періодамъ въ секунду. Обыкновенно работаютъ только двѣ машины, третья остается въ резервѣ.

До настоящаго времени въ различныхъ мастерскихъ завода установлено 17 двигателей, мощность которыхъ въ сложности равняется 119 киловаттамъ или приблизительно 150 силамъ. Мощности отдѣльныхъ двигателей слѣдующія: одинъ двигатель въ 33 киловатта (употребляется для подъема угля), два двигателя въ 22 киловатта, одинъ въ 14,5, одинъ въ 9,5, одинъ въ 5,8 киловаттовъ, остальные въ 2 киловатта и меньше. Въ настоящее время устанавливаются еще два двигателя большихъ размѣровъ. Бушеро, описавшій подробно эту установку *) (съ рисунками и чертежами мастерскихъ, машинъ и т. п.), даетъ слѣдующія величины отдачъ: отдача большихъ двигателей—94%, самыхъ маленькихъ (1,1—киловатта)—74%. Средняя общая отдача двигателей—89%. Бушеро считаетъ, что эти машины могутъ съ честью выдержать сравненіе съ машинами постояннаго тока той же мощности. Двухфазные двигатели при равной отдачѣ стоятъ не дороже двигателей постояннаго тока (включая въ цѣну первыхъ и приспособленія для пусканія въ ходъ), вращаются же они съ меньшей скоростью. Генераторы двухфазнаго тока при одинаковой отдачѣ стоятъ на 15% дешевле динамомашинъ постояннаго тока той же мощности.

Берлинская фирма *Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft* выработала типы трехфазныхъ двигателей для разныхъ спеціальныхъ цѣлей, напр. для приведенія въ движеніе станковъ, центробѣж-

*) Bull. de la Soc. Intern. des Electriciens XI, 482, Dec. 1894.

ныхъ машинъ, элеваторовъ и т. п. Особенно тщательно разработаны двигатели для центробѣжекъ въ 1—7 силъ. Большія центробѣжки употребляются въ хлѣбопекарныхъ заведеніяхъ, меньшія на сахарно-рафинадныхъ заводахъ. Напримѣръ сахарный заводъ П. Швенгера сыновей въ *Uerdingen*'ѣ на Рейнѣ весь снабженъ электрическими двигателями, число которыхъ доходитъ до 91, дающими въ сложности 490 силъ. На Брейтенбургскомъ цементномъ заводѣ въ Лагердорфѣ установлены два трехфазныхъ генератора, каждый въ 110 силъ, доставляющихъ энергію подъемнымъ машинамъ, насосамъ и т. п. механизмамъ. Машиностроительный заводъ въ Коломнѣ, близъ Москвы, обладаетъ трехфазной установкой въ 600 силъ, служащей для приведенія въ движеніе станковъ и крановъ въ мастерскихъ [1]). О трехфазныхъ машинахъ, построенныхъ *Allgemeine Electricitäts Gesellschaft* для Страсбургской центральной станціи будетъ сказано въ слѣдующей главѣ.

Станки въ мастерскихъ Компаніи Вестингауза въ Питсбургѣ въ Соединенныхъ Штатахъ приводятся въ движеніе двухфазными двигателями Тесла. Вся установка состоитъ [2]) изъ 39 двигателей, мощностью отъ 10 до 80 силъ. Въ суммѣ всѣ двигатели вмѣстѣ даютъ 800 силъ. Въ близкомъ будущемъ еще будутъ установлены шестнадцать двигателей, которые увеличатъ мощность вдвое. Генераторы примѣнены нового типа, превосходящаго изображеннный на фиг. 39, такъ какъ въ нихъ обѣ цѣпи соединены съ одной обмоткой по способу, указанному на фиг. 26. Освѣщеніе мастерскихъ тоже производится отъ двухфазной сѣти.

---

[1]) Кромѣ Коломенской установки въ Россіи есть и другія подобнаго рода, напр. въ Новороссійскѣ, гдѣ громадный элеваторъ работаетъ трехфазными токами (см. статью переводчика въ журн. «Электричество» за 1895 г.). *(Пр. пер.)*.

[2]) *Electricity* (U. S. A.) Vol. VIII, 169, 185 (1895). См. также этотъ журналъ отъ 15 мая 1895 г., гдѣ приведены данныя относительно испытанія отдачи одного изъ двигателей Тесла.



ГЛАВА XV.

Распредѣленіе многофазныхъ токовъ съ центральныхъ станцій.

Если электрическая станція служитъ только для электрическаго освѣщенія, то нѣтъ никакой выгоды употреблять многофазные токи предпочтительно передъ однофазными перемѣнными токами. Но если станція предназначается еще и для другихъ цѣлей, напримѣръ, для распредѣленія механической энергіи, то преимущества многофазныхъ токовъ выступаютъ ярко.

Долгое время единственнымъ примѣромъ распредѣленія энергіи съ центральной станціи помощью многофазныхъ токовъ, была установка города Гейльброна, получавшая энергію въ видѣ трехфазнаго тока изъ Лауффена, отстоящаго на 15 километровъ. Всю установку устраивалъ мюнхенскій инженеръ Оскаръ фонъ-Мюллеръ, любезности котораго мы обязаны тѣми данными, которыя помѣщаемъ ниже.

Въ Лауффенѣ установлены тѣ же генераторы, которые служили для знаменитой передачи изъ Лауффена въ Франкфуртъ (фиг. 30). Каждый изъ нихъ даетъ 4000 амперъ при 50 вольтахъ. При помощи трансформаторовъ этотъ токъ превращается въ токъ въ 40 амперъ и 5.000 вольтъ, передаваемый по проволокамъ въ 6 мм. въ діаметрѣ, подвѣшеннымъ въ воздухѣ на масляныхъ изоляторахъ, укрѣпленныхъ на деревянныхъ столбахъ. Въ Гейльбронѣ три получаемые тока при помощи другихъ трансформаторовъ превращаются въ токи въ 133 ампера и 1.500 вольтъ. Эти токи распредѣляются по различнымъ кварталамъ города. Всего установлено три тюрбины (одна запасная), два генератора, два трансформа-

16

тора, подымающіе напряженіе, и два трансформатора, понижающіе его. Окончательное пониженіе напряженія съ 1.500 вольтъ до 100 вольтъ производится въ Гейльбронѣ маленькими трансформаторами въ 5 и 10 киловаттовъ, размѣщенными на особыхъ подставкахъ въ 25 пунктахъ. Токи отъ этихъ трансформаторовъ идутъ уже въ лампы и двигатели потребителей. Трехфазный концентрическій броневой кабель распредѣляетъ токъ по улицамъ всего на протяженіи почти 8 километровъ. Двигатели, дуговыя лампы и лампы накаливанія включены во всѣ три цѣпи. Къ концу 1897 года на освѣщеніе шла энергія эквивалентная 11.000 восьмисвѣчныхъ лампъ и кромѣ того было установлено 25 двигателей съ общей мощностью въ 53 силы. Маленькіе двигатели до 3-хъ силъ приблизительно прямо включаются въ цѣпь, безъ всякихъ приспособленій для пусканія въ ходъ. Они всѣ обыкновеннаго типа трехфазныхъ двигателей съ роторомъ въ видѣ бѣличьяго колеса.

Двигатели большей мощности, до 8 силъ, снабжаются приспособленіемъ для пусканія въ ходъ съ жидкимъ реостатомъ такъ, что токъ полной силы не берется раньше какъ черезъ 15—20 секундъ въ продолженіе которыхъ двигатель успѣваетъ принять нормальную скорость, тогда его прямо включаютъ въ распредѣлительную сѣть. Почти на половинѣ дороги между Лауффеномъ и Гейльброномъ, въ Зонтгеймѣ, нѣсколько лампъ накаливанія, служащихъ для уличнаго освѣщенія, питаются трансформаторомъ, понижающимъ напряженіе прямо съ 5.000 вольтъ до 100 вольтъ. Регулированіе напряженія въ трехъ цѣпяхъ, какъ показалъ опытъ, не представляетъ никакихъ трудностей. Двигатели сами стремятся уравнять напряженіе и токи въ трехъ цѣпяхъ, хотя бы число лампъ въ нихъ не было бы одинаково.

Между другими многофазными станціями, работающими въ настоящее время, упомянемъ о Дрезденской желѣзнодорожной станціи, о станціяхъ въ Хемницѣ, Буда-Пештѣ, Страсбургѣ и Боккенгеймѣ.

Въ Хемницѣ Муниципальная станція трехфазной системы устроена фирмой Сименса и Гальске въ 1894 г. Генераторы типа «*R*» даютъ токъ въ 52 ампера при 2.000 вольтъ. Они имѣютъ внѣшнюю неподвижную арматуру, сердечникъ которой составленъ

изъ кольцеобразныхъ дисковъ, и внутренній, звѣздообразный, подвижной индукторъ съ 40 перемѣнными полюсами. При 150 оборотахъ въ минуту частота равняется 50 періодамъ въ секунду. Около внутренней периферіи сердечника арматуры продѣлано 120 каналовъ, т. е. по 3 канала на полюсъ, въ которыхъ помѣщена обмотка. Каналы сужены у концовъ и въ нихъ вставлены деревянныя втулки, удерживающія обмотки. Обмотки соединены, какъ показано на фиг. 41, причемъ внѣшнія изогнутыя ихъ части расположены въ двухъ плоскостяхъ и всѣ катушки одной фазы соединены послѣдовательно. Одинъ конецъ каждой изъ трехъ серій обмотокъ соединенъ съ концами остальныхъ двухъ въ общей точкѣ, три же свободные конца присоединены къ зажимамъ машины. Такимъ образомъ обмотки соединены звѣздой (фиг. 58). Вспомогательная катушка на каждомъ генераторѣ доставляетъ токъ въ 25 вольтъ къ синхронизирующему прибору. Всего установлено три генератора, вращаемыхъ каждый отдѣльной машиной тройного расширенія съ конденсаціей. Если возбужденіе индукторовъ поддерживать постояннымъ, то паденіе напряженія при полной нагрузкѣ сопротивленіемъ безъ самоиндукціи, равняется 7%. Но когда въ цѣпь включены двигатели, то паденіе становится гораздо большимъ и, чтобы компенсировать его, приходится усиливать возбуждающій токъ на 20—30%. Отъ генераторовъ токъ черезъ предохранители, прерыватели и измѣрительные приборы поступаетъ въ три шины, укрѣпленныя на распредѣлительной доскѣ, отъ которыхъ уже идутъ фидеры съ токами высокаго напряженія къ распредѣлительнымъ проводамъ. Токъ въ 2.000 вольтъ идетъ по трехжильнымъ концентрическимъ кабелямъ со свинцовой оболочкой и броней къ трансформаторамъ, распредѣленнымъ по городу въ двадцати четырехъ пунктахъ, гдѣ онъ и превращается въ токъ въ 120 вольтъ. Всего въ городѣ около 10 километровъ кабелей высокаго напряженія, около 9 километровъ трехфазнаго концентрическаго кабеля низкаго напряженія и около $6^1/_2$ километровъ одиночныхъ проводовъ. Наиболѣе удаленная точка находится приблизительно на разстояніи 3 километровъ отъ генераторной станціи, которая расположена сама приблизительно въ $1^1/_2$ километрахъ отъ центра города. Къ концу 1894 года на

*

освѣщеніе лампами накаливанія шла энергія эквивалентная 11.000 восьми-свѣчныхъ лампъ. Кромѣ того, было установлено 160 дуговыхъ лампъ и 30 двигателей, средній размѣръ которыхъ былъ 2 силы. Двигатели имѣютъ статоръ съ кольцевой обмоткой, помѣщенной, подобно обмоткѣ генераторовъ, въ каналахъ. Роторы двигателей тоже устроены изъ кольцеобразныхъ желѣзныхъ дисковъ, и снабжены около внѣшней периферіи каналами, въ которыхъ помѣщаются катушки, соединенныя также звѣздой. Ихъ свободные концы присоединены къ контактнымъ кольцамъ. Это устройство позволяетъ включать въ цѣпь ротора при пусканіи въ ходъ сопротивленія, которыя выключаются по мѣрѣ того, какъ двигатель пріобрѣтаетъ скорость. При нормальной скорости, сопротивленія совершенно выключаются. Полное описаніе этой установки съ рисунками и чертежами помѣщено въ *Elektrotechnische Zeitschrift*, за февраль 1895 г.

Въ Страсбургѣ инженеромъ Оскаръ фонъ-Миллеромъ принята трехфазная система. Генераторы «Индукторнаго типа», построенные Берлинскимъ заводомъ *Allgemeine Elektricitäts Gesellchaft*, имѣютъ мощность въ 400 силъ каждый. Они были описаны Доливо-Добровольскимъ въ *Elektrotechnische Zeitschrift* 7-го февраля 1895 г.

Въ Боккенгеймѣ, весьма большомъ пригородѣ Франкфурта, трехфазная станція устроена фирмой Ламейеръ и К°. На станціи поставлены два трехфазные альтернатора, каждый въ 150 киловаттовъ, того же типа, что и въ Лауффенѣ (см. стр. 29), т. е. съ неподвижными арматурами и подвижнымъ индукторомъ, имѣющимъ, однако, только 8 полюсовъ. Генераторы эти даютъ токъ въ 80 вольтъ, который тутъ же поступаетъ въ трехфазные трансформаторы, подобные изображенному на фиг. 153, подымающіе напряженіе до 660 вольтъ. Этотъ токъ по кабелямъ отводится въ различные распредѣлительные центры. Трехфазные двигатели соединяются непосредственно съ этими проводами высокаго напряженія; для освѣщенія же установлены трансформаторы, понижающіе напряженіе. Въ дома токъ проводится посредствомъ трехфазныхъ концентрическихъ кабелей. Двигатели примѣняются асинхронные, мощностью до 20 силъ. Они приходятъ въ движеніе не только при полной нагрузкѣ, но и при перегрузкѣ.

Однако, двигатели свыше 8 силъ снабжаются холостыми шкивами для того, чтобы ихъ можно было пускать въ ходъ и безъ нагрузки. Въ приборахъ для пусканія въ ходъ пользуются водяными реостатами. Исключительно для освѣщенія существуетъ еще сѣть съ постоянными токами. Двигатели поглощаютъ въ суммѣ свыше 200 силъ.

Регулированіе напряженія въ трехъ цѣпяхъ не представляетъ никакихъ затрудненій. Если при трехфазномъ распредѣленіи примѣнена система соединенія звѣздой (подобная фиг. 67), то четвертый проводъ, идущій къ общей точкѣ трехъ цѣпей генератора служитъ для уравненія напряженій, когда число лампъ въ трехъ цѣпяхъ неодинаково. Однако, Гёргезъ, разбирая установку въ Хемницѣ, показалъ, что этотъ проводъ не необходимъ. Можно въ соотвѣтствующемъ мѣстѣ сѣти помѣстить трехфазный уравнитель, который имѣетъ видъ трехфазнаго трансформатора только съ одной обмоткой на каждомъ сердечникѣ. Это будетъ на самомъ дѣлѣ трехфазная реакціонная катушка или трехфазный автотрансформаторъ. Его три катушки соединяются звѣздой и четвертый проводъ отъ цѣпей проводятъ къ ихъ общей точкѣ. Гёргезъ приводитъ примѣръ, когда въ одну цѣпь было введено 100 лампъ, въ другую 20 лампъ и въ третью всего 1 лампа, что вызывало значительную разность напряженій въ трехъ цѣпяхъ, пока четвертый проводъ не былъ соединенъ съ общей точкой уравнителя.

Какъ только это сдѣлали, напряженія во всѣхъ цѣпяхъ стали равны. Трехфазные двигатели, помѣщенные въ цѣпь имѣютъ тоже уравнительное вліяніе на напряженіе въ цѣпяхъ. Нѣсколько лѣтъ тому назадъ Доброволъскій указалъ, что такое же вліяніе имѣютъ и трехфазные трансформаторы.

Въ Буда-Пештѣ фирма Шуккертъ и К° устроила двухфазную станцію, внѣ города, о которой было говорено на стр. 206.

Двухфазная станція, устроенная по системѣ Стэнли, Келли и Чезней, существуетъ въ Питтсфильдѣ (Массачусетсъ). Такая же станція устраивается теперь въ Монреалѣ.

Въ слѣдующей таблицѣ приведены данныя относительно станцій, устроенныхъ по трехфазной системѣ заводомъ Эрликонъ.

Названіе станцій.	Число силъ каждой единицы.	Мощность станціи въ лош. сил.	Разстояніе передачи въ килом.	Напряженіе въ линіи въ вольтахъ.	Цѣль.
Лауффенъ-Гейльбронъ	300	600	10	5000	Распред. свѣта и работы
Діэтиконъ-Цюрихъ	300	300	15	5000	» работы . . . .
Гохфелденъ-Эрликонъ	300	900	25	13000	» » . . . .
Пержинъ (Тироль)	100 200	300	2	1800	» свѣта и работы
Вангенъ (Виртембергъ)	100	200	11	5000	» » »
С. Этьенъ (Франція)	300	600	6—15	5000	» » »
Флоренсакъ (Франція)	100	200	—	5000	» » »
Трибергъ (Германія)	150	300	15	5000	» » »
Беллегардъ (Франція)	600	600	0,8	1000	» работы . . . .
Бремгартенъ-Цюрихъ	325	1300	18	5000	» » . . . .
Инсбрукъ (Тироль)	100	200	2	1800	» свѣта и работы
Толедо (Испанія)	200	200	—	3500	» » »
Бліэзъ-Швейгенъ (Германія)	175	350	4	5000	» » »
Рива (Тироль)	150	450	—	3500	» свѣта . . . .

При нашемъ перечисленіи мы вовсе не упоминали о значительномъ числѣ отдѣльныхъ установокъ на заводахъ и т. п., гдѣ многофазныя системы передачи и распредѣленія энергіи, повидимому, должны замѣнить всѣ остальныя. Въ дополненіе къ тѣмъ даннымъ о такихъ установкахъ, устроенныхъ фирмами Эрликонъ и Броунъ-Боверъ и К°, которыя мы привели на стр. 234 и 235, слѣдуетъ еще прибавить данныя объ установкѣ въ *Hellsjön* въ Швеціи, гдѣ покойнымъ Венстремомъ устроена передача трехфазными токами около 400 силъ на разстояніе около 20 килом. [1])

Моноциклическая система. Штейнмецъ предложилъ [2]) систему распредѣленія электрической энергіи для цѣлей освѣщенія и вращенія двигателей, которую, хотя въ ней въ сущности пользуются больше, чѣмъ однимъ цикломъ или одной фазой, онъ назвалъ «*моноциклической*».

Въ этой системѣ надѣются соединить качества многофазныхъ системъ для вращенія двигателей съ удобствами регулированія однофазной системы. При нормальныхъ условіяхъ вся энергія доставляется двумя проводами, между которыми поддерживается постоянное напряженіе (перемѣннаго тока). Въ тѣ мѣста, гдѣ требуется двигательная сила, проводится третья проволока, отъ которой можетъ быть взятъ токъ, отличающійся по фазѣ отъ главнаго, и при помощи котораго можно пускать двигатель въ ходъ. Обмотки двигателя устроены такъ, что, когда достигается полная скорость, обратная электродвижущая сила становится въ точности равной напряженію въ третьей проволокѣ, такъ что отъ нея уже не будетъ браться никакогю тока, весь же токъ будетъ доставляться двумя главными проводами. Одинъ изъ способовъ поддерживать разность фазъ, въ третьей проволокѣ состоитъ въ томъ, что на альтернаторѣ наматываются катушки смѣщенныя относительно главныхъ настолько, что въ нихъ индуктируется электродвижущая сила, отличающаяся отъ главной по фазѣ на

---

[1]) См. *G. Kapp.* «Electric transmission of Energy» p. 418; 4-ое англ. изданіе 1894 года.

[2]) «*Electric. World* XXV т. 182, Feb. 1895. и *Boistel.* Distribution monocyclique; L'Eclairage Electr. III, p. 152, April 1895.

90°. Одинъ изъ концовъ этихъ сдвинутыхъ катушекъ присоединенъ къ серединѣ главной обмотки, другой же конецъ къ упомянутой третьей проволокѣ. Число витковъ въ сдвинутыхъ катушкахъ подбирается такъ, чтобы электродвижущія силы, образующіяся въ нихъ и въ соединенной съ ними послѣдовательно половинѣ главной обмотки имѣли требуемую разность фазъ.

Когда установлено нѣсколько двигателей, то обратная электродвижущая сила одного какого нибудь работающаго двигателя достаточна для того, чтобы можно было пустить въ ходъ другой, такъ что, если въ установкѣ есть двигатели, работающіе непрерывно, то третью проволоку не требуется приводить къ альтернатору.

Такимъ образомъ моноциклическая система представляетъ собою въ дѣйствительности трехфазную систему, въ которой двѣ фазы почти противуположны, а вспомогательная третья отличающаяся отъ этихъ двухъ почти на 90°, примѣняется для пусканія въ ходъ двигателей. Нельзя утверждать, что эта система не многофазная, только потому, что она не симметричная.

Авторъ этой книги придумалъ нѣсколько другихъ способовъ достигать того же результата. Одинъ изъ нихъ основанъ на примѣненіи двухъ перемѣнныхъ токовъ съ какою угодно разностью фазъ между 90° и 120°, въ обыкновенной трехпроводной сѣти, причемъ поддерживать надо постоянную разность потенціаловъ между каждой крайней проволокой и средней. Для пусканія двигателей въ ходъ образуютъ третью цѣпь изъ двухъ крайнихъ проволокъ, въ которой будетъ токъ, не совпадающій по фазѣ съ прежними двумя. Въ точности знать напряженіе и фазу этого третьяго тока не важно. Двигатели можно употреблять и трехфазные и двухфазные съ общимъ возвратомъ.

Другую несимметричную систему предложилъ Имгофъ.

Тамъ, гдѣ обыкновенные однофазные токи распредѣляются по трехпроводной системѣ, какъ, напр., въ Лондонскомъ Сити, тамъ въ высшей степени удобно устроить разность фазъ въ третьей проволокѣ, что позволитъ удобно пускать двигатели въ ходъ. Дѣйствительно, если хоть одинъ трехфазный двигатель будетъ пущенъ въ одной изъ цѣпей, то онъ будетъ помогать остальнымъ приходить во вращеніе, такъ какъ будетъ стремиться самъ поддержать требуемую разность фазъ.

Американскіе примѣры освѣщенія трехфазными токами одинъ въ Конкордѣ другой въ Виноски описаны въ «*Western Electrician*» отъ 16 февраля 1895 г., и въ «*Electrical Engineer*» за іюнь 1895 г.

Въ Балтиморѣ существуетъ теперь двухфазная станція съ четырьмя альтернаторами Вестингауза въ 1.000 киловаттовъ каждый. Они доставляютъ токъ какъ для дуговыхъ лампъ, такъ и для лампъ накаливанія. Въ установкѣ примѣняются двухфазные двигатели Тесла.

Наибольшая электрическая установка въ мірѣ—установка многофазная: Это именно установка на Ніагарѣ (см. стр. 42), гдѣ примѣнены двухфазные токи. Она начнетъ работать въ ближайшемъ будущемъ.

Какъ ни недавно были изобрѣтены многофазные токи, быстрое развитіе ихъ примѣненій вполнѣ ужъ выяснило практическое значеніе этихъ токовъ. Однако, предѣлъ ихъ развитія далеко еще не достигнутъ. Задачи о превращеніи перемѣнныхъ токовъ въ постоянные едва только начали получать рѣшенія. Къ какимъ результатамъ приведутъ новѣйшіе способы превращенія — никто не можетъ предсказать. Въ ближайшемъ будущемъ развитіе примѣненій электричества быть можетъ будетъ таково что превзойдетъ самыя смѣлыя ожиданія электриковъ.

ОГЛАВЛЕНІЕ.

